

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA***

EVALUACIÓN DEL MANEJO DEL RIEGO POR MEDIO DE SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN UN CULTIVO DE TOMATE PARA INDUSTRIA

presentado por
ALBA LAGUNAS ALLUÉ

INGENIERO AGRONOMO
NEKAZARITZA INGENIARITZA

Director/a
Nuria Vázquez García

Codirector/a
José Javier López Rodríguez

Autor/a
Alba Lagunas Allué

ABRIL, 2013

AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo Final de Carrera se ha realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario de La Rioja para adquirir el título de Ingeniero Agrónomo en el Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Pamplona, por lo que agradezco enormemente a estos dos organismos tanto la disposición de medios humanos y materiales como la oportunidad de participar en el ensayo experimental desarrollado.

A D. José Javier López Rodríguez, codirector del Trabajo Final de Carrera desarrollado en el departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra, por su enseñanza, apoyo y dedicación constantes a lo largo de la titulación.

A Dña. Nuria Vázquez García, directora de este trabajo, por su valiosa colaboración y aportación en el seguimiento del trabajo, su orientación y sus correcciones tan acertadas, siempre dispuesta a ayudarme en cualquier circunstancia.

A D. Alfonso Pardo Iglesias, director del departamento de recursos naturales del CIDA, por su enseñanza, apoyo y dedicación constantes en el desarrollo del ensayo.

A Pilar Yécora y Cristina Casis, por la realización de los análisis de laboratorio y su buena disposición a ayudar en el campo, compañeras, consejeras y amigas en todo momento.

A Joaquín Bruno Huete, por su colaboración y apoyo en la elaboración de este trabajo, su consejo y por ser amigo además de compañero.

A Alejandro Soba, Javier Romero, Óscar Castro y Francisco Balanza por su disposición y participación en los trabajos de campo, siempre compañeros divertidos con buenos consejos y palabras de ánimo.

A D. Enrique García Escudero y a todo el personal del S.I.D.T.A de La Rioja, por su apoyo e interés, y a aquellas personas que directa o indirectamente han sido partícipes de este trabajo.

Quisiera acabar dando gracias a las personas más importantes de mi vida: a mi madre y hermana, por su apoyo incondicional y por sus palabras de ánimo. A Javi, por ser la persona que comparte más tiempo a mi lado, porque en su compañía las cosas malas se convierten en buenas y, porque gracias a él soy capaz de conseguir el equilibrio que me permite dar lo máximo de mí. Nunca le podré estar lo suficientemente agradecida y, también le quiero dedicar este trabajo terminado en compensación por el tiempo que por él le he robado. Y a todos mis amigos y allegados en general, por soportarme y apoyarme.

Seguramente me dejo muchos nombres y personas que me han ayudado, pido disculpas por ello de antemano, y hago extensivo el agradecimiento a todos los que han hecho posible este trabajo.

INDICE

RESUMEN	III
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO	2
1.1.1. Estimación de la ET con fórmulas empíricas	3
<u>1.1.1.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o: Método FAO- Penman- Monteith</u>	<u>3</u>
<u>1.1.1.2. Evapotranspiración del cultivo, ET_c: coeficiente dual del cultivo.</u>	<u>4</u>
1.2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO	7
1.2.1. Método directo: gravimetría	7
1.2.2. Métodos indirectos: sensores de humedad	8
<u>1.2.2.1. Sistemas de medida del contenido volumétrico de agua</u>	<u>8</u>
<u>1.2.2.2. Sistemas de medida del potencial de agua del suelo</u>	<u>10</u>
<u>1.2.2.3. Factores a considerar en la elección de sensores de humedad</u>	<u>11</u>
1.3. RIEGO POR GOTEO Y ACOLCHADO PLÁSTICO	13
1.4. EL CULTIVO DEL TOMATE DE INDUSTRIA	16
1.5. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	20
2. MATERIAL Y MÉTODOS	22
2.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	22
2.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	24
2.3. FERTILIZACIÓN	25
2.3.1. Abonado de fondo	25
2.3.2. Abonado de cobertera: Fertirrigación	27
2.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL CULTIVO	28
2.5. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO. NECESIDADES HÍDRICAS	29
2.5.1. Cálculo de las necesidades hídricas	30
2.5.2. Lluvia efectiva	33
2.5.3. Eficiencia en el uso del agua	34
2.5.4. Integral térmica	34
2.5.5. Modelo de programación del riego. Hoja de cálculo	35
2.6. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO	35
2.6.1. Método directo: gravimetría	35
2.6.2. Métodos indirectos: sensores de humedad	37
<u>2.6.2.1. Sensores Ech₂o: instalación</u>	<u>38</u>
<u>2.6.2.2. Sensores Watermark: Instalación</u>	<u>39</u>

2.6.3. Balance de agua en el suelo.....	39
2.7. DESARROLLO DEL CULTIVO Y PRODUCCIÓN	42
2.7.1. Cobertura y altura del cultivo.....	42
2.7.2. Biomasa.....	44
2.7.3. Maduración	44
2.7.4. Cosecha y calidad de la cosecha.....	44
2.8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	45
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.1-. COBERTURA Y ALTURA DEL CULTIVO	46
3.2-. BIOMASA.....	48
3.3-. EVOLUCIÓN DE LA MADURACIÓN DEL CULTIVO	49
3.4-. PRODUCCIÓN	50
3.4.1-. Cosecha	50
3.4.2-.Calidad de la cosecha.....	51
3.5-. AGUA APLICADA.....	52
3.6-. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUAR)	54
3.7. EVOLUCIÓN DEL AGUA EN EL SUELO.....	55
3.7.1. Balance de agua	61
3.8. COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DESCRITAS	63
4. CONCLUSIONES	64
5. BIBLIOGRAFIA.....	65

RESUMEN

El objetivo del trabajo es evaluar la utilidad del empleo de sensores de humedad de suelo para automatizar y complementar la metodología FAO 56 en la programación de riego por goteo de alta frecuencia y bajo acolchado plástico, de un cultivo de tomate para procesado (*Lycopersicum esculentum* Mill.) durante la campaña de 2012 en el valle del Ebro (La Rioja). Para ello se diseña un ensayo en el que se establecen cuatro tratamientos de riego sobre acolchado plástico: dos de ellos basados en una estrategia de reposición del agua empleada por el cultivo mediante establecimiento a 0,15 m de profundidad de sensores capacitivos Ech₂o (Ac_Ech₂o) y sensores de matriz granular Watermark (Ac_Wat), otro, con un método clásico basado en la estimación de la ET del cultivo y la aplicación de agua según el método descrito en FAO 56 (Ac_P) y el cuarto con un método mixto donde al sistema FAO 56 se le incorpora la información sobre la humedad del suelo a la hora de tomar la decisión de riego en momentos concretos, después del riego de trasplante y tras eventos de lluvia (Ac_Ps). Adicionalmente se mantuvo un tratamiento de suelo desnudo (Ds_P) aplicando riego según ETc.

En todos los tratamientos se instalan sensores de humedad del suelo tanto de tipo capacitivo como de bloque de matriz granular, situándolos en la zona radicular del cultivo a 0,15 y 0,5 m de profundidad. En el caso de los tratamientos Ac_Ech₂o y Ac_Wat se mantiene la humedad del suelo a 0,15 m a un nivel establecido. Para el análisis del comportamiento de los distintos tratamientos se consideran dos periodos de riego: el periodo de trasplante, donde se aplica la misma cantidad de agua con riego en todos los tratamientos y el periodo de cultivo donde el riego se aplica en función de cada tratamiento.

No se han encontrado diferencias en los parámetros de desarrollo del cultivo (cobertura, altura, biomasa y maduración), ni en producción entre los tratamientos de riego en suelo acolchado. El rendimiento comercial medio obtenido ha sido de 128 t/ha. La cantidad total de agua que finalmente se ha aplicado en cada tratamiento ha sido similar. Sin embargo, la distribución a lo largo del cultivo ha sido diferente, en los tratamientos con sensores el volumen aplicado es mayor hasta alcanzar el máximo desarrollo del cultivo y menor en la fase de media estación (hasta alcanzar el 10% de frutos maduros).

Aunque los eventos de lluvia durante el cultivo fueron escasos, los sensores de humedad de suelo fueron capaces de modular el riego y reducir el agua aplicada durante estos momentos con respecto a los tratamientos basados en la ETc. Por tanto, el modelo de programación de riego basado en FAO 56 puede mejorar su eficacia mediante la combinación con el uso de sensores de humedad del suelo reduciendo el agua de riego aplicada tras el trasplante y eventos de lluvia.

1. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del agua de riego disponible es clave para conseguir rentabilidad en agricultura y debe ser un objetivo básico en la mejora de la gestión de los recursos hídricos. Por ello, el conocimiento del consumo de agua por los cultivos y el manejo adecuado del riego son factores muy importantes para la realización de unas buenas prácticas agrarias. El agua aplicada en exceso o en momentos inadecuados puede provocar erosión, pérdida de nutrientes por lixiviación y/o la contaminación de las aguas subterráneas; y aplicada en cantidad insuficiente para el cultivo puede ocasionar un escaso desarrollo y reducción de la producción. El manejo eficiente del agua empleada en agricultura se fundamenta en la elección del sistema de riego adecuado, la modernización de los regadíos, el ajuste de la dosis de riego a las necesidades reales del cultivo en cada momento y evitar las pérdidas de agua por escorrentía e infiltración fuera del alcance de las raíces. Por tanto, mejorar las técnicas de programación de riego no sólo produce un ahorro del agua, sino que también reduce el riesgo del lavado de nutrientes, principalmente nitrógeno, y minimiza el impacto de la agricultura en las aguas subterráneas, además de asegurar el correcto desarrollo del cultivo.

La programación del riego se basa principalmente en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos, el conocimiento del estado hídrico de las plantas y la determinación del agua del suelo disponible para el cultivo. El nivel de agua en suelo se puede medir mediante el uso de sensores de humedad instalados de forma apropiada en zonas representativas del cultivo permitiendo observar y estimar la distribución de la humedad y determinar si el riego es excesivo o deficitario.

En los últimos años se han desarrollado distintos sistemas que permiten conocer en tiempo real el contenido de humedad del suelo. Suponen una herramienta importante que facilita la toma de decisiones en la programación del riego, tales como determinar la cantidad de agua y el momento de aplicarla. Así, se evitan pérdidas excesivas por percolación profunda o por escorrentía para reducir los impactos ambientales o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente y optimizar la producción.

A partir de estos sistemas, junto a medios de control y los componentes de riego necesarios (electroválvulas, programadores, etc), se han desarrollado y estudiado métodos de automatización de riego que desencadenan el mismo en función de los niveles de humedad del suelo. Estos sistemas se han empleado en diferentes cultivos hortícolas como pimiento (Dukes, et al. 2003), tomate (Muñoz-Carpena et al., 2003), calabacín (Zotarelli et al. 2008), cebolla y patata (Shock et al.2002) y en general, se ha observado que su uso permite un uso más eficiente del agua y la disminución del lixiviado de nitrato.

Mejorar el manejo del agua en los cultivos, permite conservar agua y aumentar la rentabilidad en las tierras agrícolas. Por lo tanto, el manejo del riego, y con ello su monitorización, constituye una técnica efectiva para obtener cosechas ajustadas, en cuanto a cantidad y calidad, a los requerimientos del mercado.

1.1. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO

El conocimiento de las necesidades hídricas del cultivo es el primer paso para la optimización del agua de riego.

De la totalidad de agua que llega a la planta en forma de precipitación o riego, una parte muy importante es la que aprovecha la planta en los procesos de transpiración. Otra parte se evapora directamente de la superficie del suelo y pueden ocurrir fenómenos de escorrentía superficial y percolación por debajo de la zona radical. En los cultivos es complicado diferenciar el proceso de transpiración a través de los estomas de la planta, del proceso de evaporación directa a partir del suelo, ya que en la naturaleza ocurren de forma simultánea. Al proceso conjunto de pérdida de agua a la atmósfera tanto por la acción de las plantas como por el suelo se le conoce como evapotranspiración (ET). Dicho proceso tendrá lugar siempre y cuando haya energía solar disponible para el cambio de estado de las moléculas de agua. Además, su tasa será mayor o menor en función de la disponibilidad de agua del suelo y de la demanda ejercida por el cultivo en sus distintas fases de desarrollo. El concepto de evapotranspiración se define a continuación:

- **Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o):** es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23. Se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un adecuado aporte de agua.
- **Evapotranspiración del cultivo (ET_c):** se refiere a la evapotranspiración en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia (ET_o) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto. Los valores de evapotranspiración de los diferentes cultivos se relacionan con la evapotranspiración de la superficie de referencia (ET_o) por medio de los coeficientes de cultivo. Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo (K_c) o separadas en dos coeficientes, un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e), por lo que $K_c = K_{cb} + K_e$. La evapotranspiración del cultivo es equivalente a las necesidades hídricas de un cultivo.

La precisión de medida de la evapotranspiración para un suelo y cultivo concreto es complicada debido a los múltiples factores que se ven implicados, aunque existen métodos que tanto de forma directa como indirecta permiten obtener medidas o estimaciones muy ajustadas a las condiciones locales.

Tanto la evapotranspiración de referencia como la de cultivo, se pueden medir sobre un lisímetro de pesada o mediante métodos como el balance de agua y de energía. Además, existen procedimientos que estiman la ET mediante fórmulas empíricas basadas en datos climáticos más o menos fácilmente disponibles. En la publicación de la serie de riegos y drenajes número 56 de FAO, “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (Allen et al, 2006), se hace una descripción completa de los diferentes métodos de estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos.

1.1.1. Estimación de la ET con fórmulas empíricas

1.1.1.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo: Método FAO- Penman- Monteith

La evapotranspiración de referencia, ETo, se ve afectada por factores climáticos, ya que expresa el poder evaporativo de la atmósfera en una determinada localización y momento del año, pero sin embargo no considera las características del cultivo o del suelo. Una situación habitual es la estimación de la evapotranspiración de referencia mediante fórmulas empíricas basadas en parámetros climáticos.

El método de FAO-Penman-Monteith permite calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) diaria (mm/día) y horaria (mm/hora) con buenos resultados. Es una ecuación desarrollada a partir de la ecuación original Penman–Monteith y ecuaciones de resistencia aerodinámica y superficial para el cultivo de referencia.

Su expresión para periodos diarios es la siguiente:

$$E_{To} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma\left(\frac{900}{(T + 273)}\right)U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)}$$

Siendo:

ETo : Evapotranspiración de referencia (mm · día⁻¹)

Rn: Radiación neta (MJ · m⁻² · d⁻¹)

G: Flujo de calor al suelo (MJ · m⁻² · d⁻¹)

T: media diaria de la temperatura del aire a 2 m de altura (°C)

U₂: velocidad del viento a 2 m de altura (m·s⁻¹)

e_s: Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a: Presión real de vapor (kPa)

e_s – e_a: déficit de presión de vapor (kPa · °C⁻¹)

Esta ecuación ha sido ampliamente aceptada como método de cálculo de ET de referencia. Para conseguir mayor precisión, es importante que los datos climáticos empleados en el cálculo de la ETo representen, en el mayor grado posible, las condiciones definidas para el cultivo de referencia. Este método fue validado y calibrado en el valle del Ebro en el año 2000 por Lecina y Martínez-Cob, que obtuvieron estimas aceptables de la ETo diaria.

1.1.1.2. Evapotranspiración del cultivo, ETc: coeficiente dual del cultivo.

Una vez estimado el valor de la ETo, la evapotranspiración del cultivo, ETc, puede obtenerse multiplicando el dato del ETo por un coeficiente adimensional específico para cada cultivo, Kc, denominado coeficiente de cultivo. Este coeficiente integra las características y particularidades del cultivo en cuestión, que lo hacen diferente del cultivo de referencia y representa la proporción de ET de un determinado cultivo respecto de la ET del cultivo de referencia mediante la siguiente expresión:

$$ETc = Kc \cdot ETo$$

El coeficiente de cultivo, Kc, integra las características fundamentales de cada cultivo que lo diferencian del cultivo de referencia. Según FAO 56 (Allen et al., 2006), estas características son:

- Altura del cultivo: influye en el término de resistencia aerodinámica, o transferencia de vapor de agua desde el cultivo a la atmósfera.
- Albedo o reflectancia del cultivo y de la superficie del suelo a la radiación de onda corta, cuyo valor está afectado por la fracción de suelo cubierto por la vegetación y por la humedad de la superficie del suelo.
- Resistencia superficial del cultivo: dependiente de área foliar, edad de la hoja y grado de control estomático.
- Evaporación del suelo.

El método más extendido para la estimación de Kc es el propuesto por FAO 24 (Doorembos y Pruitt, 1977), cuyo valor se determina experimentalmente como:

$$Kc = ETc / ETo$$

En esta metodología, Kc se representa como un conjunto de segmentos lineales que corresponden a cuatro fases del desarrollo del cultivo: el periodo inicial, desde el trasplante hasta que el cultivo alcanza el 10% del suelo cubierto; el periodo de desarrollo, desde el fin de la etapa anterior hasta que el cultivo cubre efectivamente el suelo; el de media estación, cuando el cultivo alcanza el máximo desarrollo y comienza la

maduración y el de estación tardía, que finaliza en la cosecha. Los periodos inicial y de media estación se caracterizan por segmentos horizontales y los periodos de desarrollo y de estación tardía por ser respectivamente líneas de ascenso y descenso.

En las últimas décadas, esta metodología fue revisada e implementada, para considerar la proporción de evapotranspiración del cultivo debida por un lado a la propia transpiración de la planta, y por otro lado a la evaporación del suelo. En consecuencia, el coeficiente de cultivo se propone como un coeficiente dual de reparto de evaporación y transpiración, calculado a partir de dos coeficientes: un coeficiente basal o de transpiración de cultivo (K_{cb}), y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e). Su expresión final es la siguiente:

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

Siendo:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) \cdot ET_o$$

Componente de transpiración ($K_{cb} \cdot ET_o$)

El coeficiente de cultivo basal representa únicamente la transpiración del cultivo. No obstante, el producto " $K_{cb} \cdot ET_o$ " incluye un componente residual de evaporación difusiva procedente del agua del suelo bajo la superficie seca y bajo la vegetación.

Una primera aproximación a los valores de K_{cb} (Wright, 1982), lo define como un coeficiente representativo de la evapotranspiración de un cultivo cuando la superficie del suelo se encuentra lo suficientemente seca para que no se produzca evaporación, pero donde la disponibilidad de agua en la zona radicular de la planta es adecuada para que la transpiración ocurra a tasa potencial.

En la publicación de FAO 56 (Allen et al., 2006) se presentan valores tabulados de K_{cb} para diferentes cultivos durante el periodo inicial ($K_{cb\ ini}$), el periodo de media estación ($K_{cb\ mid}$) y el final de estación ($K_{cb\ end}$).

Para el caso del cultivo de tomate, la curva de coeficientes basales, K_{cb} , tabulados por FAO 56 (Allen et al., 2006) se muestra en la figura 1 con el valor correspondiente para cada uno de los periodos.

Los valores de K_{cb} indicados, son representativos para un clima estándar con humedad relativa mínima diaria ($R_{h\ min}$) 45% y con velocidad media diaria del viento (U_2) de $2\ m \cdot s^{-1}$. En el caso de no cumplirse estas condiciones climáticas, su valor puede variar por diferencia de propiedades aerodinámicas entre el cultivo y la superficie de referencia, por lo que FAO 56 recomienda la corrección de los coeficientes tabulados para media estación ($K_{cb\ mid}$) y la estación tardía ($K_{cb\ end}$) cuando su valor es superior a 0,45.

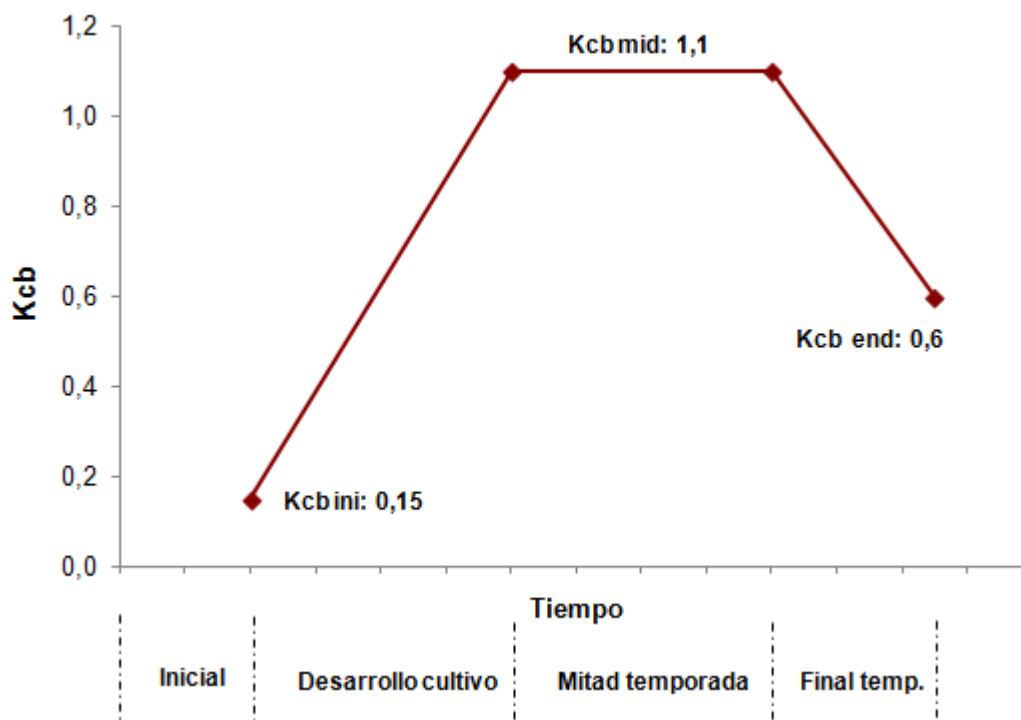


Figura 1. Curva de coeficientes basales en tomate en los diferentes periodos de desarrollo del cultivo.

Componente de evaporación ($K_e - E_{To}$)

El coeficiente de la evaporación K_e representa la componente de la evaporación en el valor de E_{Tc} . Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, después del riego o la lluvia, el valor de K_e será máximo. Cuando la superficie del suelo se encuentra seca, K_e será pequeño o incluso cero cuando no exista agua remanente en la superficie del suelo para ser evaporada.

Según Burt et al. (2005), la evaporación del suelo está afectada por el contenido de agua en suelo, la presencia o ausencia de cubiertas en el cultivo y las condiciones ambientales. Además la evaporación desde la superficie de las plantas depende, entre otros factores de la capacidad de las cubiertas vegetales para almacenar agua, y del periodo de tiempo que llueve o se riega el cultivo.

La estimación de K_e en el procedimiento dual de FAO 56 requiere un balance de agua diario para la fracción de suelo expuesta y humedecida (f_{ew}). Esta fracción es a su vez función de la fracción de suelo humedecida por el sistema de riego (f_w) y la fracción de suelo cubierto por la vegetación (f_c) (Allen et al., 2006). Para su cálculo se considera que la evaporación en el suelo ocurre en dos etapas:

- **Fase limitante de energía:** momento inmediatamente después de un evento de lluvia o riego, donde la superficie del suelo está húmeda y la evaporación ocurre a tasa potencial, limitada únicamente por la energía disponible para evaporar.

- Fase de caída de evaporación: en esta etapa, el transporte hidráulico de la humedad subsuperficial hacia la superficie del suelo disminuye y no se puede evaporar a tasa potencial. La disponibilidad de agua en la superficie del suelo es menos, y la tasa de evaporación se reduce. En el modelo de FAO 56, la reducción de la evaporación en esta etapa se expresa como una función lineal del agua total evaporada de la capa superficial. Esta función depende de aspectos relacionados con la tasa de extracción de agua por las raíces de las plantas; de las características del suelo como textura, densidad, perfil térmico; de la demanda potencial evaporativa y de la profundidad de la capa de evaporación (Allen et al., 2006).

1.2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

1.2.1. Método directo: gravimetría

Método sencillo y fiable para determinar directamente el contenido de agua del suelo. Es ampliamente utilizado como método de comparación de otro tipo de medidas de la humedad del suelo. Su mayor inconveniente radica en que es un método destructivo, por lo que no se puede repetir el muestreo en el mismo lugar y no permite, para un punto concreto, realizar un seguimiento de la humedad del suelo continuado en el tiempo. El contenido de agua se expresa como la proporción de masa de agua presente en una muestra de suelo (θ_g).

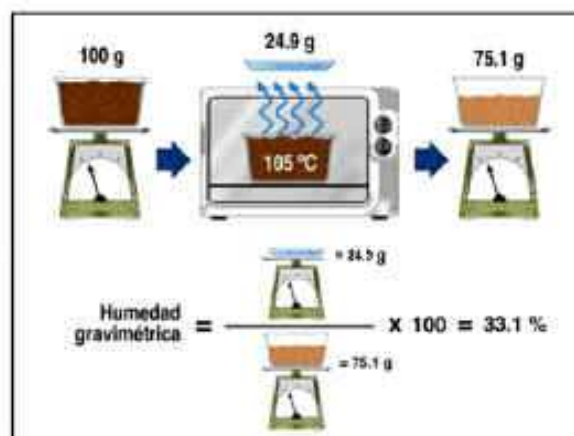


Figura 2. Proceso de determinación de la humedad gravimétrica.

El procedimiento para determinar la humedad gravimétrica se muestra en la figura 2. Consiste en tomar o extraer muestras de suelo en la profundidad de interés. Las muestras se pesan húmedas, se secan en estufa a una temperatura de 105 °C hasta peso constante y se vuelven a pesar. La diferencia entre el peso de la muestra húmeda y la seca es la cantidad de agua que, relacionada con el peso seco del suelo, representa el contenido de humedad en el momento de muestreo. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\theta_g (\%) = \frac{\text{Masa} \cdot \text{de} \cdot \text{agua}}{\text{Masa} \cdot \text{suelo} \cdot \text{seco}} \cdot 100$$

Con los datos obtenidos se calcula el estado hídrico del suelo por unidad de masa de suelo y dicha unidad se relaciona con la densidad aparente (d_a) para expresar el resultado por unidad de volumen de suelo obteniendo la humedad volumétrica (θ_v).

$$\theta_v = \theta_g \cdot d_a$$

1.2.2. Métodos indirectos: sensores de humedad

Existen otras técnicas de determinación del estado de humedad del suelo basadas en métodos indirectos los cuales miden otras propiedades del suelo que varían con el contenido de agua. Se basan en la utilización de sensores de humedad.

Hay dos maneras de indicar el estado hídrico de un suelo, como potencial hídrico o como contenido de agua. El potencial de agua en el suelo determina la disponibilidad de agua para las plantas y es una indicación directa de la energía que éstas han de vencer para extraer agua del suelo. El potencial del agua en el suelo es la suma del potencial gravitacional, el osmótico (debido a la salinidad del suelo/agua) y el matricial (la retención que el medio poroso – suelo – ejerce sobre el agua que contiene). En la práctica el potencial gravitacional y el osmótico no se consideran y el término “potencial de agua en el suelo” se usa indistintamente y sin diferenciación del “potencial matricial”.

El contenido de agua en el suelo y el potencial matricial están relacionados mediante las curvas de retención de humedad. Esta relación es diferente para cada tipo de suelo, así, cada textura de suelo tiene una relación única entre ambos parámetros.

En función de la manera de indicar el contenido de agua en el suelo hay dos tipos de sensor, los que miden la tensión o succión a la que está retenida el agua en el suelo, y los que miden el contenido total de humedad en el suelo expresada en porcentaje volumétrico.

1.2.2.1. Sistemas de medida del contenido volumétrico de agua

Están basados en diferentes principios, pero en todos ellos se introduce un sensor en el suelo. Por ello, es muy importante el buen contacto entre el sensor y el suelo. Mediante una adecuada calibración local, ofrecen valores de humedad del suelo que pueden registrarse de forma continuada en el tiempo. Son sistemas basados en la medida de la constante dieléctrica del suelo, atenuación de neutrones y disipación de calor.

La constante dieléctrica es una medida de la capacidad de un material no conductor para transmitir ondas o pulsos electromagnéticos. La constante dieléctrica de un suelo seco es menor que la del agua y pequeños cambios en la cantidad de agua libre del suelo tienen un gran efecto en las propiedades del sistema agua – suelo. Los sistemas desarrollados para esta medida son:

- **TDR (Time Domain Reflectometry)**: este método permite cuantificar la humedad volumétrica del suelo en función del tiempo de recorrido de un pulso electromagnético transmitido en el suelo. Este tiempo es proporcional a la constante dieléctrica del medio aire – agua – suelo, y únicamente varía con el contenido de agua del mismo. La metodología TDR es un método relativamente rápido y de alta precisión que puede resultar muy útil en estudios de dinámica del contenido de agua en el suelo. Sin embargo, algunos autores recomiendan su calibración cuando se utilice en suelos con alto contenido en materia orgánica y de textura fina, así como en condiciones de salinidad.
- **FDR (Frequency Domain Reflectometry)**: es un método basado en la medida de la capacitancia del sistema aire – agua – suelo, que transforma los cambios de frecuencia de resonancia de un circuito en medidas volumétricas de la humedad del suelo. La sonda de capacitancia mide la constante dieléctrica del volumen de suelo usando un sensor conectado por un cable de fibra óptica a un logger. En función del sensor empleado su uso en campo puede ser bien enterrado directamente, o bien a través de un tubo de acceso. Entre sus ventajas destaca la posibilidad de obtener un registro de datos de humedad continuo a lo largo del perfil del suelo sin disturbar las propiedades del mismo. Sin embargo, las medidas están referidas a un escaso volumen de suelo en torno a la sonda, lo cual requiere una cuidadosa instalación de la sonda o del tubo de acceso en el campo. Además estas sondas precisan de una calibración previa en suelos arcillosos o con altos contenidos de materia orgánica.

Otros sistemas que determinan el contenido de humedad del suelo son:

- **Sonda de neutrones**: el fundamento de este método consiste en la atenuación de la velocidad de los neutrones emitidos por una fuente radiactiva al chocar con los núcleos de hidrógeno del suelo. Puesto que el agua es la principal fuente de hidrógeno en el suelo, el número de neutrones lentos interceptados por el detector es una medida precisa del contenido volumétrico de agua. Como otros métodos requiere una calibración local y reviste complicaciones debido a la alta variabilidad de los valores obtenidos. Debe ser manejado por personal cualificado puesto que se utiliza una fuente radiactiva.
- **Dispositivos combinados de contenido volumétrico de agua – disipación de calor**: varios de los sensores de succión de agua del suelo consisten en sensores de contenido volumétrico de agua embebidos en materiales porosos con propiedades de retención de agua conocidas. El contenido de agua del material se equilibra con la succión del suelo que lo rodea y es medido por un sensor. La humedad del suelo se determina a través de la medida de la capacidad de calor del agua, para lo

cual se requiere una fuente de calor y un sensor de temperatura enterrados en el suelo a la profundidad elegida. El contenido volumétrico de agua se calcula a partir del input de calor emitido por la fuente y el cambio de temperatura registrado. Las sondas de disipación de calor tienen una esfera de medida pequeña (alrededor de 1 cm de diámetro), lo cual las hace útiles si se pretende conseguir alta resolución espacial, siempre y cuando se disponga de muchas sondas. Estas sondas son útiles para realizar medidas en serie, aunque requieren de logger sofisticados para medir la temperatura, las variables energéticas y controlar el tiempo de medida. Su calibración requiere conocer la densidad y capacidad de calor del suelo donde se introduce el sensor.

1.2.2.2. Sistemas de medida del potencial de agua del suelo

Existen otro tipo de medidas indirectas que estiman la humedad del suelo mediante medidas puntuales y precisas del potencial de agua. El potencial matricial está relacionado con fuerzas adsorptivas de la matriz del suelo, por ello lo ideal es conseguir dos curvas de calibración, una para secado y otra para humectación del suelo. Estas medidas son las denominadas técnicas tensiométricas y los dispositivos que incluyen son los tensiómetros y los sensores de resistencia o conductividad eléctrica (bloques de yeso y los sensores de matriz granular).

- Tensiómetros: Miden la tensión a la que está sometida el agua en el suelo (succión). El sensor consiste en un tubo lleno de agua con una cápsula de cerámica porosa en uno de sus extremos que se entierra en el suelo a la profundidad de medición deseada; el otro extremo del tubo está conectado a un manómetro o indicador de vacío (vacuómetro).

El suelo ejerce una tensión (tensión matricial) sobre el agua de la columna que hace que la altura de agua en ella descienda, pasando al suelo y provocando por tanto una presión negativa. El tensiómetro mide directamente energía (cb, centibares), es decir, el esfuerzo que las raíces deben realizar para extraer el agua del suelo. Entre sus ventajas destaca que es un método rápido de medida de potenciales mátricos del suelo in situ, tienen bajo coste, son relativamente fáciles de instalar y mantener y miden directamente la succión de agua. Como inconvenientes cabe citar que se trata de un método que requiere cierto tiempo de reacción y un mantenimiento periódico, no son adecuados para medir potenciales de agua mayores a 75 cb, y además requieren calibración para un suelo concreto si se emplean para conocer el contenido de humedad del suelo.

- Sensores de resistencia eléctrica (bloques de yeso): miden la conductividad eléctrica de un medio poroso en contacto con el suelo a través de un voltaje de corriente alterna que se establece entre dos electrodos en un material poroso en contacto con el suelo. Estos sensores consisten en una matriz porosa donde se incrustan dos electrodos. El sensor puede ser enterrado en el suelo hasta la profundidad de medición deseada, y muestra características de retención de agua semejantes al suelo donde se encuentra. El sensor está conectado mediante un cable de dos hilos a un medidor que se utiliza para leer la resistencia del sensor. El principio de medida consiste en la disolución del

sulfato de calcio (CaSO_4) del que está hecho el sensor en el agua que se encuentra dentro del sensor poroso, favoreciendo la conductividad del agua entre los dos electrodos y disminuyendo la resistencia. Cuanto menor es la resistencia dentro del sensor, mayor es el contenido de agua que puede encontrarse entre los electrodos. La relación entre el contenido de agua y el potencial del sensor presenta histéresis, es decir, un contenido de agua dado en el sensor puede corresponder a más de un valor de potencial, por ello, la resistencia eléctrica del sensor debe estar adecuadamente calibrada en términos de tensión de agua en el suelo. La calibración y el rango de sensibilidad del sensor de conductividad dependen de la distribución del tamaño de poro del material entre los electrodos.

- **Bloques de matriz granular (GMS):** Dos electrodos se introducen dentro de un bloque con material poroso y homogéneo que incluye una pequeña porción de CaSO_4 para amortiguar el efecto de las sales del suelo. Este cuerpo poroso se encuentra dentro de un cilindro de acero inoxidable perforado. El bloque está en contacto directo con el suelo y permite que la humedad se mueva a su través secándose cuando el suelo se seca y humedeciéndose cuando el contenido de humedad del suelo aumenta. A través de los electrodos es posible medir la resistencia eléctrica del bloque, que depende, básicamente, de la variación de humedad en su interior; menor resistencia indica un mayor contenido de humedad. El empleo de yeso permite introducir un efecto tampón en la lectura de la resistencia eléctrica que reduce el efecto de las sales, como las procedentes de fertilizantes, que pudiera tener en la lectura.

1.2.2.3. Factores a considerar en la elección de sensores de humedad

Los sistemas de monitorización de la humedad en el suelo son herramientas muy útiles para conocer la humedad del suelo en todo momento. Por ello es importante conocer las variables que pueden influir en las lecturas que los sensores nos aportan para realizar una elección apropiada del tipo de sensor a utilizar, definir los criterios a emplear durante su instalación (tipo y posicionamiento), analizar las lecturas considerando los límites de precisión y representatividad que nos aporta el sensor en el entorno en el que está instalado y evaluar el origen de posibles discrepancias que pueden aparecer estableciendo si se deben a errores de funcionamiento del sistema o errores experimentales, entendiendo estos como las limitaciones que tiene el sistema para medir los diferentes parámetros.

Las variables que afectan a las lecturas obtenidas por los sensores de suelo dependen de las cualidades físico-químicas del suelo, del movimiento del agua en el suelo y, por último, de las características técnicas del sensor y los factores asociados a su instalación. Entre las variables a considerar se distinguen:

Factores que dependen del suelo:

- Textura/estructura del suelo. La textura influye en el valor de las lecturas obtenidas y su interpretación, especialmente cuando se usan sensores cuya lectura es el porcentaje de agua en suelo, puesto que para diferentes texturas el suelo tiene diferentes capacidades de retención de agua. La estructura tiene importancia sobre la manera en la que el agua se infiltra en el terreno debido a la influencia que esta puede provocar en la aparición de caminos preferenciales del agua.
- Elementos gruesos: Tienen gran importancia debido a su poca capacidad de absorción/adsorción. Representan porciones de suelo incapaces de retener agua y por tanto las lecturas de los sensores pueden verse alteradas, en especial los valores absolutos procedentes de sensores que miden el % de agua en suelo, debido a que la humedad de estos elementos no sufre variaciones.
- Densidad aparente. El asentamiento producido por la gravedad y la repetición de ciclos de llenado y vaciado de agua, provocan que el suelo adquiera una densidad que viene dada, generalmente, por la textura/estructura de éste. La densidad aparente es un buen indicador de la existencia de macroporos, que están rellenos de aire hasta que el agua ocupa su lugar y, por tanto, pueden producir grandes variaciones en las medidas obtenidas de los sensores.
- Propiedades químicas (especialmente CIC y presencia de sodio). Ejercen influencia sobre la cantidad de agua que el suelo puede retener, la capacidad de las plantas para extraer agua compitiendo contra la tensión osmótica creada por los iones presentes en la solución del suelo y en el caso del sodio sobre la estructura del suelo.

Factores que dependen de la hidrología y el riego:

- Permeabilidad y existencia de caminos preferentes. La permeabilidad de un suelo depende básicamente de su porosidad y en menor medida de la existencia de cationes que interfieren en el movimiento del agua.
Es necesario considerar que los diferentes horizontes existentes en un suelo pueden tener diferentes permeabilidades que influyan en la velocidad del movimiento del agua en el suelo y crear capas de encharcamiento o de rápido drenaje.
- Orografía del terreno (especialmente existencia de pendientes y escorrentías superficiales). El movimiento del agua se produce por gravedad, el agua se desplaza siempre al lugar donde su potencial es menor. En el caso de suelos de baja permeabilidad el agua puede desplazarse por la superficie (escorrentía) variando la distribución teórica que se podría esperar y produce zonas con mayor "pluviometría" que otras.

La permeabilidad y orografía se deben de tener en cuenta al determinar tanto el lugar como el método de instalación del sensor, para que el suelo que rodea al sensor una vez instalado sea representativo.

- Cobertura del riego (uniformidad en sistemas de riego no localizado y bulbo en sistemas de riego localizado). El objetivo del sistema de riego es obtener una distribución uniforme de agua emitida y acercarla lo más posible al lugar donde el cultivo espera encontrar agua.

Factores que dependen del sensor:

- Características técnicas del sensor. Todos los sensores disponen de una precisión de medida, que puede variar en función de la variación de diferentes parámetros como temperatura, salinidad y otras características del medio en el cual se efectúa la medida.
- Calibración del sensor. Los fabricantes de sensores de capacitancia ofrecen curvas de calibración generales para diferentes tipos de suelo, sin embargo, si se desea obtener el valor real de humedad del suelo en el punto de medida es necesario realizar una calibración previa en el mismo suelo donde el sensor se va a emplear. En la práctica no es habitual realizar esta calibración debido a que, si bien la lectura proporcionada puede ser incorrecta en valor absoluto el sensor se comporta de forma coherente en su rango de medida y ofrece las mismas lecturas en los distintos rangos de humedad. Por ello, sin necesidad de calibrar es posible establecer los límites de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez y/o humedad mínima aceptable que son los valores necesarios para establecer la estrategia de riego.
- Instalación: considerando la alta sensibilidad de los sensores y su calibración y testado en fábrica, es lógico suponer que la mayoría de los problemas existentes, lecturas erráticas, desproporcionadas, sensores que no registran la variación de humedad o la tensión al realizarse riegos, etc, se pueden explicar por las características y circunstancias de la instalación.

Por tanto, se deben considerar diferentes variables durante la instalación para asegurar que los datos proporcionados por los sensores son representativos y válidos para la toma de decisiones de riego. Entre ellas la calidad y profundidad de la instalación del sensor, situación respecto al emisor e instalación horizontal o vertical del cuerpo del sensor.

1.3. RIEGO POR GOTEO Y ACOLCHADO PLÁSTICO

El riego pretende proporcionar el agua a las plantas para que éstas reciban la humedad suficiente con el fin de que se desarrollen y optimicen su ciclo vital. El riego por goteo surge como respuesta a esta necesidad y

ofrece muchos beneficios, entre los que se encuentran: la reducción del consumo de agua, ya que provee a la planta de la cantidad exacta de agua que necesita; menor requerimiento de mano de obra, no sólo por mantenimiento sino por la menor incidencia de las malas hierbas en el cultivo y facilidad para la automatización y mecanización; incremento de la producción y mejora de la calidad de la cosecha; mejor manejo de control de plagas y enfermedades. Además, la posibilidad de aplicar nutrientes disueltos en el agua mediante técnicas de fertirrigación ha permitido reducir la aplicación de fertilizantes y mejorar su eficiencia al controlar la pérdida de nutrientes por lavado.

Los sistemas de riego por goteo se caracterizan por la localización del agua de riego y la posibilidad de aplicar riegos de alta frecuencia. Con la localización sólo se humedece parte del volumen del suelo y las raíces obtendrán de ese volumen, el agua y los nutrientes que necesitan. El efecto de la localización se manifiesta modificando la evaporación, la transpiración y la distribución de las raíces. La alta frecuencia tiene consecuencias en el régimen de humedad en el suelo, manteniendo una alta humedad constante, lo que afecta a la absorción de agua, concentración de sales, aireación, etc.

De esta forma se asegura el reemplazo de la pérdida de agua en el suelo y las plantas que tiene lugar por el proceso de evapotranspiración, manteniendo la zona radical bajo condiciones constantes de humedad y minimizando simultáneamente las pérdidas por evaporación directa, escorrentía y percolación profunda por debajo de la raíz de la planta. Así la estrategia de programación consiste en reponer la ET acumulada desde el último riego.

La cubierta vegetal, acolchado o “mulching” es una técnica empleada para proteger el suelo de la acción de los agentes atmosféricos que resecan el suelo, enfrían la tierra y arrastran los fertilizantes. También puede mejorar la calidad de los frutos evitando el contacto directo entre el suelo y el fruto. Desde la aparición de las láminas de plástico en los años 60 su empleo se ha incrementado significativamente. Su empleo en el valle del Ebro se sitúa a finales de los años 80, iniciando su aplicación en cultivo de tomate de industria con riego por inundación.

Actualmente se conoce que estas cubiertas favorecen el incremento de la masa radical y la absorción de nutrientes por las plantas (Wien et al., 1993). A ello se debe añadir otros beneficios relacionados con mejoras en el rendimiento, la calidad y el desarrollo vegetativo de numerosas especies hortícolas (Ham y Kluitenberg, 1994), originando producciones más tempranas (Wien et al., 1993), que hacen posible, en el caso del cultivo de tomate, adelantar el momento de la cosecha más de 7 días respecto del cultivo en sistemas con suelo desnudo (Macua et al., 1999, 2009a). Muchas investigaciones han demostrado que la productividad, el rendimiento y la calidad de los cultivos pueden aumentarse por las modificaciones en el régimen de temperatura y humedad del suelo inducidas por el acolchado (Bhella, 1988a; Maiero et al., 1987). Sus efectos en el rendimiento de los frutos son atribuidos por un lado al incremento en la temperatura del suelo (Taber, 1983), a un uso más eficiente del agua del riego y de los fertilizantes (Bhella, 1988b; Jones et al., 1977; Sweeney et al., 1987) y a un mayor control de malas hierbas y/o plagas en el cultivo (Gabriel et al., 1994). A ello se suman los beneficios derivados del establecimiento de condiciones de humedad del

suelo más favorables para el desarrollo del cultivo, fundamentalmente en aquellos sistemas combinados con riego por goteo.

Los plásticos tradicionalmente más utilizados en agricultura son los de polietileno (PE), aunque también son comunes los de poli-cloruro de vinilo (PVC), etileno vinil acetato (EVA) y polipropileno (PP). Las propiedades espectrales de este tipo de plástico tienen un efecto apreciable en el balance de radiación de onda corta y larga, incrementando la radiación neta sobre el cultivo. Vázquez (2004), midió la temperatura del suelo con y sin acolchado plástico a 5 y 25 cm de profundidad en un cultivo de tomate. Los resultados obtenidos muestran incrementos de 3 °C a 5°C y de 2 °C a 3,5 °C a 5 y 25 cm de profundidad respectivamente hasta que el cultivo alcanza el 30% de suelo cubierto. A partir de este momento y hasta la fecha de cosecha la ganancia de temperatura fue de 1 – 1,5 °C en ambas profundidades.

El uso de plástico negro presenta el inconveniente de que quedan restos en el campo que deben recogerse para no contaminar. Con el objetivo de solucionar los grandes problemas de la gestión de residuos plásticos en el sector agrícola, se emplean cada vez más para el acolchado plásticos biodegradables. Se biodegrada en el suelo sin contaminar y sin provocar fenómenos de acumulación, con lo que se evita tener que recogerlo y reciclarlo posteriormente, y por ello aunque el coste es más elevado se ahorra en costes de mano de obra en recogida. Son materiales capaces de reducir significativamente el impacto ambiental en términos de consumo de energía y generación de residuos después de su utilización.

A lo largo de los años se han llevado a cabo ensayos en diferentes cultivos (tomate de industria, pimiento, coliflor, brócoli, lechuga, etc) con acolchados de diferentes espesores y colores, para comprobar su degradabilidad, su incidencia en las bondades de los polietilenos hasta ahora empleados y la posibilidad de reducir su alto coste por hectárea, además de ensayos en los que se han comparado acolchado biodegradables con acolchados de polietileno normal y materiales similares. Con ello se ha observado que los diferentes acolchados dan los mismos resultados en términos de cantidad y calidad de cosecha, a excepción del papel, con problemas de instalación y posteriormente de roturas que influyen negativamente en la producción (Macua et al., 2005).

Desde el punto de vista de las relaciones hídricas, la combinación de los sistemas riego por goteo y acolchado plástico, producen modificaciones microclimáticas que alteran la demanda de agua de los cultivos. La experiencia demuestra que el acolchado aporta ventajas de mayor precocidad y producción, pero además potencia la acción del riego localizado. Al retener el plástico la humedad y evitar su evaporación, se puede ahorrar en número de riegos. El riego por goteo y el acolchado proporcionan una mejor eficiencia en el uso del agua, entendida como la relación entre el rendimiento y el agua de riego aplicado. Con las menores cantidades de agua empleadas la eficiencia en su uso es superior (Macua et al., 2009b). Además, la incorporación de nutrientes con el riego por goteo permite reducir el uso de fertilizantes, mejorando la calidad del agua de drenaje. Su manejo se lleva a cabo en función de las características del suelo.

1.4. EL CULTIVO DEL TOMATE DE INDUSTRIA

El tomate es una hortaliza de origen americano, rica en hidratos de carbono, minerales y antioxidantes como el licopeno. En la actualidad es la hortaliza más cultivada a nivel mundial y de mayor valor económico, siendo procesada a niveles industriales de muy diferentes formas. Se utiliza tanto para el consumo en fresco como para la fabricación de salsas, concentrados, zumos o jugos, enlatados y gazpachos.

El excedente de producción de tomate para industria en los últimos años y las consiguientes penalizaciones de la Unión Europea, produjo el descenso de hasta el 30% de la superficie cultivada en estas regiones productoras durante los años 2006 y 2007. Sin embargo, tras las política de desacople de ayudas europeas ha aumentado la demanda por parte de los industriales, con lo que las perspectivas económicas para el productor han mejorado, observándose el aumento de superficie dedicada a este cultivo durante las campañas 2008 y 2009 (MARM, 2010). En el valle del Ebro es el cultivo más arraigado y con mayor tradición dentro de las zonas de regadío. Navarra concentra la mayor superficie de cultivo (más de 2000 ha en el año 2009), mientras que La Rioja mantiene una superficie de cultivo de alrededor de 200 ha y alcanza producciones cercanas a 12500 toneladas.

El rápido desarrollo de la industria para procesado del tomate en los países desarrollados en las recientes décadas, puede ser atribuido a una serie de actividades interrelacionadas, entre las que destacan la investigación y el desarrollo, que han dado lugar a la introducción de variedades mejoradas, con alta capacidad productiva y mejores prestaciones industriales. La facilidad y rapidez con la que se procesan actualmente los tomates, dando lugar a varios productos, hace que sea una de las hortalizas más populares para las industrias conserveras y de proceso. Es notable también la innovación de maquinaria industrial, la implantación de sistemas de producción integrada que controlan la calidad, y la modernización de medios de producción y de procesado más eficientes, fundamentalmente en lo referente al incremento en la eficiencia del riego, con la utilización de riego localizado y su influencia positiva en el aspecto productivo y de calidad del producto.

En España el tomate representa más de la mitad de la producción total del sector de conservas vegetales. Las principales zonas de producción de derivados del tomate son Extremadura, el Valle del Ebro y Andalucía. Extremadura, con aproximadamente un 75% de la producción total de transformados elabora principalmente tomate concentrado, tomate en polvo, tomate frío, salsas de tomate y ketchup, además de tomate triturado y cubiteado. El Valle del Ebro (principalmente La Rioja, Navarra y Zaragoza) representa el 10% de la producción total de transformados de tomate elaborando tomate troceado o cubiteado que junto con el triturado ocupan la mayor parte de los transformados. Andalucía depende en gran parte de la zona de Extremadura y con las mismas elaboraciones.

A nivel nacional, la campaña 2012 ha sido muy buena. Aunque la superficie de cultivo ha descendido, las producciones obtenidas han sido excepcionales, con rendimientos muy por encima a las medias de los últimos años. Extremadura y Valle del Ebro, con un descenso aproximado de superficie del 14% y 5%

respectivamente, han aumentado y disminuido su producción en un 6% y un 9% respectivamente. Andalucía es la zona con más disminución de producción en relación a la campaña anterior, un 34%, pero debido principalmente a que la superficie cultivada se ha reducido prácticamente a la mitad en 2012 respecto 2011 (Macua et al., 2012).

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia de las solanáceas que se cultiva como anual. Es una planta autógama aunque existen diversos procedimientos para obtener cruzamientos. Los objetivos de la mejora genética se centran en conseguir mayor precocidad; frutos de mayor tamaño, de forma redondeada y piel consistente; resistencia a plagas, enfermedades y a determinados accidentes fisiológicos; matas compactas; producción solapada y mayor contenido en sólidos solubles (Díez, 1995).

El tomate es un cultivo afín a ambientes cálidos, con temperaturas suaves, bien iluminados y con un buen drenaje de suelo. Su desarrollo vegetativo se ve afectado por exposiciones a temperaturas inferiores a los 10 °C, escarchas, niveles de luminosidad diurna menores de 12 horas, un drenaje insuficiente en el suelo y un abonado nitrogenado excesivo. La modificación al aire libre de estos factores es complicada, sin embargo, la introducción de técnicas como el riego por goteo o el acolchado plástico permite mejoras importantes desde el punto de vista de producción y cantidad de la cosecha.

El uso de estas técnicas se ha incrementado de manera notable en los cultivos hortícolas del valle del Ebro. En la primera mitad de la década de los 90 se desarrolló la utilización de acolchados plásticos con el objetivo de obtener una época de producción lo más amplia posible. Los resultados obtenidos confirmaron la ventaja del empleo de esta técnica, que combinada con el riego por goteo se encuentra arraigada en Navarra desde finales de los años 90, empleándose en el año 2007 en el 95% del cultivo de tomate industria en regadío. Asimismo, el 70% de la superficie total contratada de este cultivo en Aragón al inicio de la década pasada se realizó con esta técnica.

En el caso del cultivo de tomate para industria, numerosos autores describen la capacidad del riego localizado para aumentar la producción de fruto sobre otras técnicas convencionales de riego, especialmente en suelos con bajas tasas de infiltración y problemas de drenaje. Asimismo, destacan la reducción del agua empleada para el riego en estos sistemas, siempre y cuando se realice un adecuado seguimiento del cultivo y se tengan en cuenta las características del suelo. El desarrollo de técnicas de riego por goteo se ha visto limitado por factores económicos y por el temor de algunos agricultores a mermas en los parámetros de calidad.

El acolchado plástico potencia las ventajas del riego localizado. Entre ellas, se destaca el efecto positivo en la altura y desarrollo vegetativo de las plantas, así como el aumento en la producción de materia seca. Además, Pardo et al. (2001) observaron en tomate mejores resultados de eficiencia en el uso del agua y producción en sistemas con acolchado plástico y riego por goteo, frente a aquellos con suelo desnudo y sistema con riego por surcos.

El riego es posiblemente el factor de producción que más importancia tiene tanto en la producción como en la calidad del tomate de industria. Este cultivo responde al régimen hídrico con un descenso en la producción de frutos, pero con ciertas mejoras de los parámetros de calidad, como el aumento en el contenido de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix). Las mayores producciones se obtienen cuando la humedad del suelo es alta y continúa en toda la fase vegetativa del cultivo, aunque un aporte de riego excesivo no conduce a aumentos en la producción de la cosecha, a expensas por otro lado, de reducir la calidad de ésta. Se ha demostrado que los métodos de riego que permiten frecuentes aportaciones de baja cantidad de agua producen elevados rendimientos y altas eficiencias en el uso del agua.

Las recomendaciones de riego para este cultivo se basan en la aplicación de riegos abundantes durante los días previos y posteriores al trasplante, con la finalidad de conseguir la humectación de los primeros centímetros de suelo, y asegurar el arraigo de las plantas. Para forzar a las plantas a emitir un sistema radical vigoroso, tras este riego inicial se deja de regar durante unos días, para comenzar a continuación con aplicaciones de riego, inicialmente ajustadas al desarrollo radicular de la planta y posteriormente a los requerimientos hídricos del cultivo.

El grado de maduración determina el momento del corte del riego. En recolecciones únicas se requiere que el 80-85% del producto final se encuentre en condiciones óptimas de maduración. Para agrupar la maduración, se suele dar un último riego cuando un 20-25% de los frutos están maduros. En el caso del riego por goteo, este momento se suele retrasar hasta 7 ó 10 días antes de la cosecha, ya que tanto el volumen de suelo humedecido como la profundidad radicular es menor, aunque hay autores que admiten que un corte de riego temprano al inicio de la maduración no afecta significativamente a la producción y puede mejorar la agrupación de la cosecha y la calidad del fruto (Macua et al., 2001).

Respecto a sus requerimientos edáficos no es muy exigente. Aunque prefiere suelos sueltos, profundos y ricos en materia orgánica, se adapta a muy diferentes tipos de suelo, desde los muy ácidos de textura arenosa hasta aquellos ligeramente alcalinos.

La calidad del tomate depende fundamentalmente de su aroma, su consistencia y su sabor. En el caso del tomate destinado para procesado, las características de calidad externa, como forma, color, y tamaño son importantes, al igual que en el de consumo en fresco. Sin embargo, son más importantes otros caracteres relativos a la calidad interna, como acidez, contenido en azúcares y materia seca. El riego es uno de los factores de producción que más influyen sobre el resultado final del cultivo de tomate para industria, tanto en lo que se refiere a la cantidad de la cosecha obtenida como a su calidad.

La necesidad de la industria de obtener productos diferenciados se hace posible gracias a una materia prima de alta calidad; y para ello, existen una serie de requerimientos de los cultivares de tomate para facilitar su recolección mecánica y posteriormente su procesado industrial. Entre ellos destacan los relacionados con el porte de la planta, maduración del fruto, desprendimiento del pedúnculo, consistencia y otras características de los frutos como color, tamaño y peso del fruto así como resistencia a enfermedades:

- **Planta:** la planta debe ser compacta y de crecimiento determinado, con un buen desarrollo foliar que permita cubrir el fruto y evitar quemaduras en éste por radiación solar directa. Para limitar la manipulación en fábrica, el pedúnculo y el cáliz se deben desprender fácilmente de la planta. El cuajado y la maduración requieren también estar concentrados en el tiempo. En el momento de la recolección, se recomienda que se alcance al menos el 75% de los frutos estén maduros, ya que por debajo de estos porcentajes decrece sensiblemente su rentabilidad económica.
- **Fruto.** Los frutos deben ser resistentes al agrietado, evitando así facilitar la entrada de hongos parásitos y saprófitos que reducen su calidad. Es importante que se presenten la suficiente consistencia como para soportar el proceso de recolección mecánica y el transporte hasta la fábrica sin sacrificar la buena apariencia. El color del fruto maduro debe ser rojo intenso y uniforme. Además del carácter varietal, está influenciado por el estado de maduración del fruto en el momento de recolección. El color en el tomate es una característica de calidad extremadamente importante, ya que determina la madurez y vida post cosecha, y es el factor determinante en cuanto a la aceptabilidad por parte del consumidor. Los valores totales para un tomate de calidad sitúan la relación a/b entre 2,2 y 2,5.

Otros índices de calidad del tomate para industria son:

- Contenido en sólidos totales y sólidos solubles: Ambos índices informan sobre la cantidad de sólidos del fruto del tomate y están correlacionados. En general, debido a la mayor facilidad de determinación, se emplea el contenido en sólidos solubles conocido como ° Brix. La mayor parte de las variedades contienen entre 4,5 y 5 ° Brix, aunque más que el carácter varietal, lo que influye sobre el contenido en sólidos solubles son la climatología durante el período de maduración y el riego (volumen total de agua, momento de corte de riego, etc.) que pueden hacer variar el contenido en °Brix para frutos de una misma variedad entre 4 y 7.
- pH: Informa sobre la acidez del tomate. El pH del zumo se sitúa normalmente entre 4,2 y 4,4. Si en algún caso el pH es superior, se pueden presentar problemas en el procesado, siendo necesario acidular el zumo.
- Acidez total y azúcares reductores: La acidez total es debida a la presencia de diversos ácidos orgánicos en el tomate (ácidos tartárico, málico, acético, cítrico, succínico, glutámico, etc.). El mayoritario es el ácido cítrico y suele oscilar entre 0,35 y 0,40 g/100 cc. Los azúcares reductores, fructosa y glucosa, representan más del 95% de los azúcares totales en el tomate y los valores normales en tomate son de 2,5 a 3,0 g/100 cc.
- Consistencia: Este parámetro es fundamental en el tomate concentrado para la fabricación posterior de algunos elaborados que requieren alto espesor, especialmente el “Ketchup”. La

viscosidad (o consistencia) se evalúa midiendo la fluidez del jugo de tomate en un período determinado de tiempo.

1.5. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Los trabajos de investigación realizados durante la última década en el Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de La Rioja (CIDA-SIDTA), sobre la programación de riego de tomate para industria en acolchado plástico y riego por goteo, dieron resultados de drenaje de prácticamente el 30% del agua aplicada (Pardo et al., 2001; Vázquez et al., 2001). En algún caso, la reducción del 20% de ETc estimada no supuso reducción alguna en la producción del cultivo (Vázquez et al., 2002).

En la Comunidad Autónoma de La Rioja, se ha trabajado durante los últimos años en el ajuste de la programación del riego en tomate mediante el método de los coeficientes de FAO a las condiciones de riego por goteo y acolchado plástico empleados en la zona. Estos trabajos se han realizado en el marco del Proyecto “Necesidades hídricas en sistemas de cultivo con riego por goteo y acolchado plástico. Ajuste de los coeficientes de cultivo” y los resultados obtenidos, objeto de la realización de una Tesis doctoral (Ibáñez, 2011), muestran que el programa de riego diseñado permite ajustar el riego a las necesidades reales del cultivo. Sin embargo, se han detectado momentos en los que se ha producido drenaje, bien provocado por la fase inicial de transplante en la que se aporta riego para asegurar la supervivencia de las plantas o por lluvias durante el período de cultivo que aumentan la reserva de agua en el suelo.

Además, durante los años 2009, 2010 y 2011 se han realizado cinco ensayos en el SIDTA, en suelos con diferente textura (franco-arenoso y arcillo-limoso), para evaluar el uso de dos tipos de sensores (los sensores de capacitancia (FDR) Ech₂o y los sensores de matriz granular (GMS) Watermark® frente al programa de riego desarrollado en el SIDTA (Ibáñez, 2011) basado en el modelo FAO, aplicando los coeficientes desarrollados en el SIDTA en la automatización de la programación del riego en un cultivo de tomate. Los resultados muestran que el uso de sensores permite reducir la cantidad de agua aplicada en el riego manteniendo el rendimiento y la calidad de la cosecha. Sin embargo, es necesario trabajar más en el estudio de los umbrales de riego para cada sensor en los distintos tipos de suelo. Se ha comprobado que los sensores Watermark presentan buen comportamiento en el rango de -10 a -65 cb independientemente del tipo de suelo, y los Ech₂o se ven más afectados por la heterogeneidad del suelo (Huete et al. 2010).

También se ha observado que el modelo de programación de riego basado en FAO puede mejorar su eficiencia si se combina con el uso de sensores de humedad del suelo, principalmente para ajustar las aportaciones hídricas en la fase posterior al trasplante y cuando ocurren eventos de lluvia. La programación basada en FAO 56 presenta la ventaja de no precisar de instalaciones siempre que se disponga de la información necesaria, pero podría mejorarse empleando sensores de suelo que nos permitan decidir el momento en que se reinicia el riego después de los momentos citados anteriormente.

A partir de los antecedentes descritos, se plantea el ensayo con el objetivo de evaluar la utilidad del empleo de sensores de humedad de suelo para automatizar y complementar la metodología FAO 56 en la programación de riego para tomate de industria mediante riego por goteo de alta frecuencia y bajo acolchado plástico. Para ello se definen las siguientes pautas:

- Definir umbrales de riego para los sensores empleados.
- Determinar con precisión el período de corte de riego después del trasplante así como en eventos de lluvia, para lo cual el uso de sensores de humedad de suelo puede resultar una herramienta eficaz.
- Evaluar el nivel de humedad del suelo en las distintas etapas del cultivo con los distintos programas de riego empleados.
- Evaluar Eficiencia en el Uso del Agua.
- Evaluar la facilidad de uso en cultivos hortícolas de las metodologías descritas.

Mediante este ensayo es posible analizar el funcionamiento del riego a lo largo de todo el ciclo de cultivo comparando una estrategia de reposición del agua empleada por el cultivo (tratamientos basados en sensores), con un método clásico basado en la estimación de la ETc del cultivo y otro mixto donde se pretende incorporar la información sobre la humedad del suelo en cada momento en la decisión de riego.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El ensayo se llevó a cabo durante el año 2012 en la finca Valdegón del Servicio de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario (S.I.D.T.A) del Gobierno de La Rioja situada en el valle del Ebro. Se utilizó la variedad de tomate “Vulcan” y para acolchar se empleó un plástico biodegradable de polímero de maíz (Mater-BI). El cultivo se hizo en mesetas de 1,5 m de ancho, con una línea de cultivo por meseta y una separación entre plantas de 0,2 m.

Los sistemas de programación de riego ensayados fueron: modelo basado en el método de los coeficientes FAO 56, modelo basado en el método de los coeficientes FAO 56 apoyado con sensores de humedad de suelo, riego pilotado por sensores Watermark y riego pilotado por sensores Ech₂o. En los sistemas de riego automático controlado por sensores el riego se abría cuando el contenido volumétrico de agua en el suelo (sensor Ech₂o) o la tensión del suelo (sensor Watermark) se encontraba por debajo de un nivel establecido para cada caso. Por tanto los tratamientos ensayados fueron:

- 1-. Testigo en suelo desnudo. Modelo basado en el método de los coeficientes (Ds_P).
- 2-. Testigo en suelo acolchado. Modelo basado en el método de los coeficientes (Ac_P).
- 3-. Suelo acolchado. Riego pilotado con sensores Watermark (Ac_Wat).
- 4-. Suelo acolchado. Riego pilotado con sensores Ech₂o (Ac_Ech₂o).
- 5-. Suelo acolchado. Modelo basado en el método de los coeficientes con apoyo de sensores de humedad de suelo (Ac_Ps).

El diseño experimental fue totalmente aleatorizado con tres repeticiones, siendo cada parcela elemental de 72 m², con tres líneas de cultivo de 15 m de longitud por repetición. Los controles se hicieron sobre la línea central de cada repetición.

La plantación se realizó el 10 de mayo con planta en cepellón. El acolchado se colocó con máquina acolchadora. El riego se realizó con cinta de goteo T-Tape con goteros a 0,2 m y un caudal de 1 l/gotero.h⁻¹, a 0,5 bar de descarga nominal. Se colocaron contadores al inicio de las repeticiones de cada tratamiento y se controlaron diariamente para conocer el volumen de agua aplicada y obtener la dosis real que proporciona el sistema de riego. Para el control de la humedad del suelo y la programación del riego de los tratamientos pilotados por sensores, se instalaron en cada repetición dos sensores de cada tipo (Watermark y Ech₂o), uno a 15 cm y otro a 50 cm de profundidad. Los sensores se instalaron a una distancia de 10 cm de la línea de goteo. En la figura 3 se muestra un esquema del ensayo realizado.

En los tratamientos Ds_P, Ac_P y Ac_Ps se aplicó el modelo de programación de riego basado en el método de los coeficientes de FAO (Allen et al., 2006) desarrollado en el SIDTA (Ibáñez, 2011). En el tratamiento Ac_Ps, tras el transplante y los eventos de lluvia se reinició el riego en función de la humedad

del suelo medida con los sensores. La ETc se calculó utilizando los coeficientes Kc corregidos en función de las condiciones advectivas del desarrollo del cultivo, la fracción del suelo mojado y la presencia del acolchado plástico. La dotación de riego se estableció dos veces por semana con los datos de los días anteriores.

En los tratamientos pilotados por sensores la programación del riego se realizó según la indicación de los sensores situados a 0,15 m de profundidad, con el objetivo de mantener la humedad del suelo en torno al 80% de agua útil. En el tratamiento Ac_Ech₂O el riego se produjo cuando el contenido volumétrico de agua en el suelo estuvo por debajo de 0,223% equivalente al 75% de agua útil y en el tratamiento Ac_Wat cuando la tensión del suelo superó el valor de -25 cb. El sistema realizó lecturas cada 5 minutos de la humedad del suelo y guardaba las medias horarias. Para desencadenar o no el riego utilizó la lectura de los 15 minutos anteriores (media de las tres lecturas 5 minutales previas al posible evento de riego) de cada sensor y calculó la media de los tres sensores situados a 0,15 m de profundidad en cada tratamiento. Si el valor medio indicaba un valor de humedad menor al umbral establecido para cada tipo de sensor se desencadenaba el riego. El sistema permitía un máximo de 8 eventos de riego cada día con una duración de entre 10 y 60 minutos en función del estado de desarrollo del cultivo y la dosis aplicada por el sistema de riego.

A efectos de programación se consideraron las fases de trasplante y cultivo. La primera estuvo comprendida desde el riego previo al trasplante hasta el arraigo de la planta (emisión de las primeras hojas nuevas). En esta fase, el riego debía asegurar la supervivencia de las plantas. En la segunda fase el riego se aplicó según las necesidades del cultivo (tratamientos Ds_P, Ac_P y Ac_Ps) o según la lectura de los sensores de humedad del suelo (tratamientos Ac_Wat y Ac_Ech₂O).

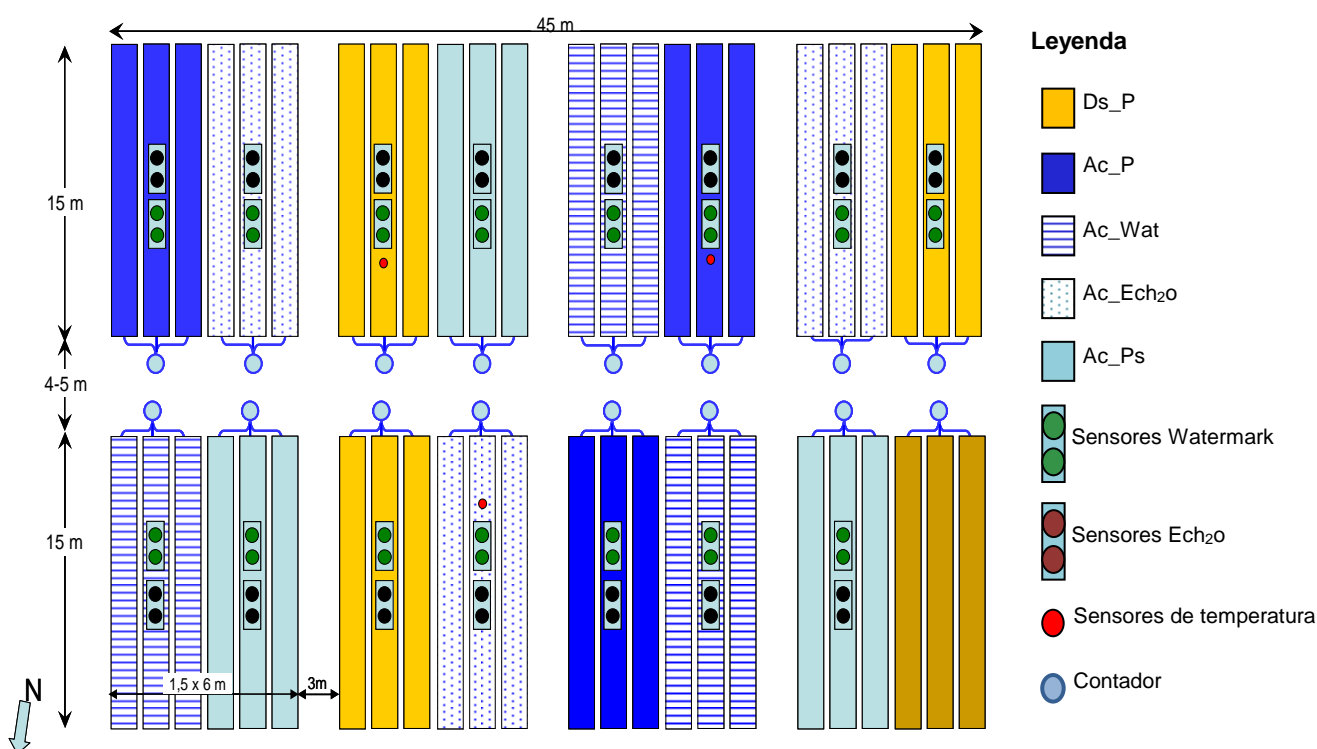


Figura 3. Esquema del ensayo.

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

En la parcela experimental, de 2.000 m², se analizaron las propiedades físico-químicas del perfil del suelo y se determinó la clasificación textural de forma previa al inicio del ensayo. El procedimiento para la recogida de muestras se llevó a cabo mediante la selección de puntos elegidos al azar y se tomaron muestras de suelo hasta 0,90 m de profundidad a intervalos de 0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm. Los análisis de dichas muestras se realizaron en el Laboratorio Regional situado en la finca “La Grajera”.

El análisis de suelo se utilizó para conocer la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas, y la cantidad que se debe adicionar aplicada en forma de fertilizante mineral para obtener un rendimiento de cultivo esperado. Cuanto mayor sea el nivel de los nutrientes en el análisis de suelo, menor es la cantidad necesaria de fertilizantes. De esta manera, los fertilizantes reponen los nutrientes extraídos por las plantas y los perdidos por lavados en profundidad que arrastra el agua de lluvias y el riego. Los resultados referidos a macronutrientes y micronutrientes se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Macronutrientes y micronutrientes observados en el análisis de suelo del ensayo.

Profundidad (m)	Macronutrientes					Micronutrientes				
	P (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	Ca (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)
0 – 0,15	6,7	385,8	548,3	140,9	31739	64,6	24,1	1,2	1,2	2,1
0,15 – 0,30	10,4	398,3	568,5	141,9	29742	61,7	23,4	1,2	1,2	2,4
0,30 – 0,60	6,9	322,6	680,6	188,4	24659	69,9	22,8	0,9	1,5	2,4
0,60 – 0,90	0,9	200,1	665,1	308,6	31788	91,1	26,2	0,7	0,9	1,5

El suelo donde se ubicó el ensayo se caracteriza por ser un suelo profundo con ausencia de pedregosidad de sus horizontes a lo largo del perfil, buen drenaje y alto contenido en arcillas que provocan la formación de abundantes grietas en superficie (Martínez et al., 2006).

Como se observa en la tabla 2, el suelo presenta textura franco arcillosa en la primera capa (0 – 0,15 m) y evoluciona a franco arcillo limoso en profundidad (0,15 – 0,60 m) según la clasificación U.S.D.A. (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos).

Tiene un adecuado contenido en materia orgánica (próximo a 2%), y ligeramente menor en profundidad aunque con valores superiores al 1%. La materia orgánica es un factor clave en la fertilidad del suelo, ya que actúa sobre las propiedades físicas (porosidad, capacidad de retención hídrica, estabilidad de agregados, etc); sobre las químicas, aportando nutrientes mediante los procesos de mineralización y a través de su capacidad de cambio de cationes, que actúa como una reserva nutricional, y sobre las biológicas, ya que mantiene la actividad microbiana del suelo.

Presenta una capacidad de intercambio catiónico entre 16 y 19 meq/100g y un contenido medio de carbonatos alto (superior al 35%). Los valores de pH son básicos (8,3 – 8,6)

Tabla 2. Caracterización físico – química del perfil del suelo.

Profundidad (m)	Arena (%) (0,05 – 2 mm)	Limo (%) (0,002 – 0,05 mm)	Arcilla (%) (< 0,002 mm)	Textura (U.S.D.A.)
0 – 0,15	21,3	49,6	29,1	Franco arcilloso
0,15 – 0,30	19,9	50,4	29,7	Franco arcillo limoso
0,30 – 0,60	18,3	46,8	34,9	Franco arcillo limoso
0,60 – 0,90	25,1	45,5	29,4	Franco arcilloso

Tabla 2. Caracterización físico – química del perfil del suelo (continuación).

Profundidad (m)	M.O (%)	pH (H₂O) (1:5)	Carbonatos (%)	CIC meq/100g
0 – 0,15	2,1	8,3	41,1	16,3
0,15 – 0,30	2,0	8,3	40,7	16,9
0,30 – 0,60	1,6	8,4	39,9	18,1
0,60 – 0,90	1,2	8,6	41,6	15,2

2.3. FERTILIZACIÓN

Mediante el abonado se aumenta la fertilidad del suelo y se restituyen los nutrientes minerales extraídos por el cultivo y perdidos por lavado. A continuación se indica la fertilización realizada durante el cultivo.

2.3.1. Abonado de fondo

El abonado de fondo se realizó antes del trasplante del tomate aprovechando las labores de preparación del terreno. De esta manera se garantizó el suministro de nutrientes al cultivo en los primeros meses de desarrollo.

Se consideró que para conseguir un rendimiento medio de 90 t/ha las extracciones del tomate de industria fueron 225 – 45 – 360 kg/ha de NPK (Hartz, T.K., 2001).

Por tanto, se calculó la cantidad de cada elemento para determinar la necesidad de adicionar nutrientes mediante fertilización considerando este rendimiento y un valor medio de densidad aparente del suelo de $1,35 \text{ t/m}^3$.

El fósforo y el potasio son elementos poco móviles y el cálculo se realizó a partir de los datos obtenidos en el análisis de suelo (tabla 1). Se estudió la presencia de los elementos a una profundidad de 60 cm en el cálculo ya que es la profundidad de extracción del cultivo.

Fósforo (P):

$$P = 0,15 \text{ m} \cdot 1,35 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \cdot 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \cdot \left(6,7 \frac{\text{g}}{\text{t}} + 10,4 \frac{\text{g}}{\text{t}} \right) + 0,30 \text{ m} \cdot 1,35 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \cdot 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \cdot 6,9 \frac{\text{g}}{\text{t}}$$

$P = 62,6 \text{ kg/ha}$. Cantidad superior en comparación con el dato de extracción de P por parte del cultivo (45 kg P/ha).

Potasio (K):

$$K = 0,15 \text{ m} \cdot 1,35 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \cdot 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \cdot \left(385,8 \frac{\text{g}}{\text{t}} + 398,3 \frac{\text{g}}{\text{t}} \right) + 0,30 \text{ m} \cdot 1,35 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \cdot 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \cdot 322,6 \frac{\text{g}}{\text{t}}$$

$K = 2894,3 \text{ kg/ha}$. Cantidad superior en comparación con el dato de extracción de K por parte del cultivo (360 kg K/ha).

Una vez analizados dichos elementos se observó que las cantidades presentes en suelo, tanto de fósforo (P) como de potasio (K), eran suficientes. Sin embargo se aplicaron 70 kg de abono complejo cuya composición NPK es $0 - 11 - 15$ para el mantenimiento del fósforo y potasio en el suelo.

Nitrógeno (N):

Debido a su alta movilidad, conviene fraccionar la cantidad total de nitrógeno a aportar para que en todo momento la planta pueda encontrar en el suelo el nitrógeno que necesita. El fraccionamiento debe hacerse procurando adaptarse en mayor grado a las exigencias del cultivo. Aunque las plantas absorben nitrógeno durante todo su ciclo vital, sus exigencias son más elevadas en las épocas de mayor velocidad de crecimiento y cuando se producen las fases de desarrollo. Del total de N aplicado, aproximadamente el 50% se añadió como fertilizante de fondo y el resto en cobertera.

Las extracciones medias del cultivo se estimaron en 225 kg N/ha , pero en ensayos previos realizados en la misma finca y en condiciones similares de cultivo, acolchado plástico y riego por goteo, se observó que es

suficiente aplicar el 50% de dicha cantidad para obtener un rendimiento adecuado. Esto es debido al elevado poder de mineralización del suelo en las condiciones en las que se produce el cultivo. El empleo de riego por goteo y acolchado plástico proporcionan condiciones de humedad y temperatura óptimas para que se active la flora microbiana, acelerando el proceso de nitrificación. Este N_{mineral} se conserva por más tiempo en las capas superficiales y medias del perfil, a disposición del cultivo gracias a la reducción de los caudales de riego, que minimizan la lixiviación del nitrógeno.

Por todo ello, en el abonado de fondo se aplicaron 40 kg de nitrosulfato amónico al 26%, lo que supuso la adición de 10,4 kg N en los 2000 m² de la parcela de ensayo o el equivalente a 52 kg N/ha.

2.3.2. Abonado de cobertera: Fertirrigación

El abonado de cobertera consiste en aportar al cultivo los elementos nutritivos que necesita para cubrir sus necesidades cuando éste se encuentra en desarrollo. En este ensayo la aplicación en cobertera del 50% de fertilizante nitrogenado se llevó a cabo mediante fertirrigación. Para ello se aplicaron 60 kg N/ha distribuidos en 6 aplicaciones, una por semana.

Se empleó un fertilizante líquido en la fertirrigación del ensayo. Se trata de una solución nitrogenada del 32% de N, cuya composición NPK es 32 – 0 – 0 y su densidad es de 1,32 kg/l. El nitrógeno aportado se distribuye en un 25 % en forma amoniacal, 25 % nítrico y 50 % ureico. No es muy salinizante, y su reacción es neutra o ligeramente alcalina.

Con los datos medios de riego, la superficie correspondiente a cada tratamiento y el tiempo de inyección estimado se estableció la cantidad adecuada de disolución a aplicar mediante fertirrigación.

Se preparó la solución fertilizante igual para todos los tratamientos. De esta manera se preparó la solución considerando el tratamiento que necesitaba mayor cantidad, Ac_P, el cual requería 8 litros de disolución (se prepararon 10 litros). El volumen que se gasta en el resto de los tratamientos se calculó en función de la concentración de la solución preparada.

A partir de los litros de disolución estimados se procedió al cálculo de la cantidad de fertilizante líquido necesario para aportar al cultivo 60 Kg N/ha en cobertera. A modo de ejemplo se detalla el cálculo para una de las parcelas:

$$60 \frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \cdot 10^{-4} \frac{\text{ha}}{\text{m}^2} \cdot 270 \text{m}^2 = 1,62 \frac{\text{kg N}}{\text{parcela}}$$

$$1,62 \frac{\text{kg N}}{\text{parcela}} / 6 \text{ aplicaciones} = 0,27 \frac{\text{kg N}}{\text{parcela} \cdot \text{aplicacion}}$$

Una vez obtenida la cantidad de nitrógeno a aplicar se procedió a la preparación de la solución fertilizante:

$$0,27 \frac{\text{kg N}}{\text{parcela} \cdot \text{aplicacion}} / \left(1,32 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 0,32 \right) = 0,64 \text{ litros de N32}$$

$$0,64 \text{ l N32} / 8 \text{ l disolución} = 0,080 \frac{\text{litros N32}}{\text{litros disolución}}$$

$$0,080 \frac{\text{litros N32}}{\text{litros disolución}} \cdot 10 \text{ litros disolución} = 0,80 \text{ litros de N32 en 10 litros de disolución a preparar.}$$

2.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL CULTIVO.

Para calcular la evapotranspiración de referencia se emplearon los datos recogidos por la estación de Valdegón perteneciente al Servicio de Información Agroclimática de La Rioja y situada en otra parcela de la misma finca donde se desarrolló el ensayo. Así, desde el trasplante de las plántulas de tomate el 10 de mayo hasta la cosecha el 28 de agosto de 2012, se recogieron los valores diarios de: temperatura media del aire, humedad relativa media, radiación solar global acumulada, velocidad media del viento a 2 m de altura y precipitación acumulada. A partir de esta información se calcularon las necesidades hídricas del cultivo así como la integral térmica. Un resumen mensual de los valores recogidos se ofrece en la tabla 3.

Tabla 3. Representación de las variables climáticas durante el cultivo de tomate comprendido desde el mes de mayo al mes de agosto.

	2012			
	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
Temperatura media (°C)	18,1	21,1	21,4	24,0
Humedad relativa media (%)	32,5	27,8	28,3	23,9
Lluvia acumulada (mm)	21,1	15,6	12,0	11,2
Velocidad de viento media a 2 m de altura (m/s)	2,3	2,0	2,2	1,9

La campaña 2012 se caracterizó por las buenas temperaturas registradas para el tomate. En general fueron suaves pero con grandes diferencias entre el día y la noche hasta el mes de agosto, en el que las temperaturas fueron más altas que otros años. En septiembre se suavizaron y a finales del mes y en octubre aparecieron las lluvias que no se habían producido en todo el cultivo. Por ello, las necesidades del cultivo se cubrieron mediante riego.

2.5. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO. NECESIDADES HÍDRICAS

Para programar el riego en el cultivo de tomate se consideraron dos fases con estrategias de manejo de riego diferente: fase inicial o periodo de trasplante y fase de desarrollo o periodo de cultivo.

En el período de trasplante se pretendía crear un horizonte húmedo en la superficie del suelo, de forma que quedase asegurada la disponibilidad de agua para las plántulas. Usando información de trabajos previos (Vázquez et al., 2001) y considerando la capacidad de retención de agua de los primeros 20 centímetros de suelo, se aplicó riego en cantidad suficiente para mantener un nivel de humedad cercano a Capacidad de Campo. El riego se inició la víspera del trasplante y se mantuvo hasta tres días después de esta operación.

En los tratamientos en los que el cálculo de las necesidades hídricas se basó únicamente en el modelo basado en el método dual de FAO 56 (Ds_P y Ac_P), la programación del riego comenzó en el momento en el que el cultivo mostró síntomas de crecimiento, comenzando lo que denominamos período de cultivo. Por otro lado, en los tratamientos en los que la programación del riego estuvo controlada por sensores (Ac_{Wat} y Ac_{Ech_2O}), tras el trasplante y los riegos realizados en la fase inicial se conectaron las electroválvulas que controlaban el riego de estos tratamientos al sistema de gestión de forma que el inicio del riego se producía cuando la lectura de los sensores determinaran que el nivel de agua disponible en suelo para el cultivo estaba por debajo del umbral previamente establecido. En el tratamiento Ac_{Ps} el comienzo del riego tras el periodo de trasplante se controló con los sensores de humedad, y se inició a la vez que en los tratamientos Ac_{Wat} y Ac_{Ech_2O} . La programación del riego finalizó en el momento del corte del riego, cinco días antes de la cosecha.

Durante el periodo de riego, en los tratamientos Ac_P y Ds_P , el volumen a aplicar fue el resultado de la resta de las necesidades hídricas del cultivo con el inicio de la programación propuesto y la lluvia efectiva, considerando una eficiencia del riego del 90%. En los tratamientos Ac_{Wat} y Ac_{Ech_2O} lo que se hizo es dar la posibilidad al sistema de que aplicara la máxima dosis de agua necesaria para cubrir las demandas calculadas según FAO 56 pero era el propio sistema el que determinaba como mantener los niveles de humedad de suelo establecidos.

2.5.1. Cálculo de las necesidades hídricas

Las necesidades hídricas del cultivo se calcularon en base a la metodología dual de FAO 56 (Allen et al., 2006). De esta manera se determinó diariamente la ETc según la expresión:

$$ETc = Kc \cdot ETo = (Kcb + Ke) \cdot ETo$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia y Kc es el coeficiente de cultivo que se descompone en el coeficiente basal (Kcb), que estima la componente de transpiración del cultivo y el coeficiente de evaporación (Ke), que estima la componente evaporativa del suelo.

Evapotranspiración de referencia (ETo)

La evapotranspiración de referencia (ETo) se calculó diariamente por el método FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 2006). Los datos climáticos necesarios para su cálculo se obtuvieron de la estación meteorológica “Valdegón” instalada en la misma finca de ensayo.

Esta estación está compuesta de cinco sensores conectados a un datalogger CR1000 (Cambell Scientific, Ltd) que realiza lecturas de los mismos cada 3 y 10 segundos, según los casos, y almacena un registro con los valores acumulados, medios, mínimos y máximos cada media hora. La descripción de los sensores es la siguiente:

- Sonda HMP 45AC de Vaisala ®, situada a 2 m de altura, para la medida de la temperatura del aire (°C) y humedad atmosférica (%).
- Piranómetro CM3 de Kipp & Zonnen ®, situado a 2 m de altura, para la medida de la radiación solar global (W/m²).
- Pluviómetro de balancín ARG 100 de Environmental Measurements ® LTD, situado a 1,0 m de altura para la medida de la lluvia (l/m²).
- Anemómetro – veleta 05103 de R.M. Young Company ®, situado a 2,5 m de altura, para la medida de la velocidad (m/s) y la dirección del viento (grados).

Dichos sensores han sido suministrados por Campbell Scientific Spain y su funcionamiento óptimo se asegura mediante el programa de mantenimiento de las estaciones de la red SIAR; así, se realiza un seguimiento diario de la información recogida anotándose las posibles derivas o problemas que presentan los distintos sensores; además, mensualmente se realiza una visita de mantenimiento a la estación procediéndose a la limpieza de los sensores y comprobándose que su funcionamiento es correcto; por último de forma bienal se realiza una calibración ‘in-situ’ de los sensores. Aquellos sensores que muestran funcionamientos dudosos en cualquier de estas comprobaciones son marcados y sustituidos enviándose posteriormente a laboratorios externos donde son recalibrados mediante una sonda patrón.

Coeficientes de cultivo

De acuerdo al enfoque del coeficiente dual del cultivo de FAO 56, se llevó a cabo un procedimiento para estimar los efectos generados por los eventos individuales de humedecimiento del suelo en el valor del coeficiente del cultivo K_c . Consiste en dividir K_c en dos coeficientes: uno para la transpiración del cultivo, denominado coeficiente basal del cultivo (K_{cb}), y otro para la evaporación del suelo (K_e):

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

Coeficiente basal (K_{cb})

El coeficiente basal (K_{cb}) empleado es el validado en trabajos previos (Ibáñez, 2011). Estos coeficientes se determinaron a partir de los propuestos para tomate por FAO 56 (Allen et al., 2006) en las diferentes etapas de cultivo: K_{cb} ini: 0,15; K_{cb} mid: 1,10 y K_{cb} end: 0,6. El coeficiente de la fase inicial fue ajustado en los tratamientos con suelo acolchado para tener en cuenta el previsible aumento de la transpiración de las plantas en esta fase del cultivo debido a las propiedades térmicas del plástico. En estos casos, el valor de K_{cb} se incrementó un 20% hasta que las plantas alcanzaron el 10% de recubrimiento del suelo. Los valores de K_{cb} asignados a cada etapa en suelo desnudo y acolchado se muestran en la tabla 4. En las fases de desarrollo y maduración se realizaron medidas periódicas de cobertura y maduración de los frutos que se emplearon para calcular el coeficiente basal en las fases intermedias de los periodos.

Tabla 4. Coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) en suelo acolchado y desnudo, en las diferentes fases de desarrollo del cultivo de tomate.

Fases	Descripción	K_{cb} Acolchado	K_{cb} Desnudo
Inicial	Trasplante – 10% Suelo cubierto	0,18	0,15
Desarrollo	10 – 80% Suelo cubierto	0,18 – 1,10	0,15 – 1,10
Media estación	80% Suelo cubierto – 10% Frutos maduros	1,1	1,1
Maduración	10% - 80% Frutos maduros	1,10 – 0,6	1,10 - 0,6

En climas donde se requieran ajustes, es decir donde el valor de HR_{min} sea diferente a 45% o donde la velocidad del viento sea mayor o menor 2 m/s los valores de K_{cb} med y K_{cb} fin que sean mayores a 0,45 deberán ajustarse utilizando la siguiente ecuación:

$$K_{cb} = K_{cb_{tabla}} + [0,04 (U_2 - 2) - 0,04 (RH_{min} - 45)] (h/3)^{0,3}$$

Donde:

K_{cb} tabla valor tabulado por FAO56 para K_c mid o K_{cb} end (si \geq de 0,45).

U_2 valor promedio de la velocidad del viento diaria a 2 m de altura (m·s⁻¹).

RH_{min} valor promedio de la humedad relativa mínima diaria.

h es la altura del cultivo (m).

Coeficiente de evaporación (K_e)

El coeficiente de la evaporación K_e representa la componente de la evaporación en el valor de ET_c . El valor de K_e será máximo cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, después del riego o la lluvia. K_e será pequeño cuando la superficie del suelo se encuentra seca, o incluso cero cuando no exista agua remanente en la superficie del suelo para ser evaporada. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$K_e = \min [K_r (K_c \max - K_{cb}), f_{ew} K_c \max]$$

Donde

K_e coeficiente de la evaporación en el suelo

K_{cb} coeficiente basal del cultivo

$K_c \max$ valor máximo de K_c después del riego o lluvia

K_r coeficiente adimensional de reducción de la evaporación dependiente de la lámina acumulada de agua agotada (evaporada) de la capa superficial del suelo

f_{ew} fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido, es decir la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación.

$K_c \max$ se calcula como el valor máximo de los parámetros entre los paréntesis { } que están separados por comas:

$$K_c \max = \max \left\{ \left[1,2 + (0,04(U_2 - 2) - 0,04(RH_{\min} - 45)) \cdot \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right], \{K_{cb} + 0,05\} \right\}$$

Donde

h altura máxima promedio de las plantas durante el período de cálculo considerado (etapa inicial, desarrollo, mediados de temporada o final) (m).

K_{cb} coeficiente basal del cultivo.

El cálculo de f_{ew} o fracción de suelo expuesta y humedecida se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Suelo Desnudo: } f_{ew} = \min \{(1 - f_c), (1 - 0,67)f_w\}$$

$$\text{Suelo Acollchado: } f_{ew} = \min \{(1 - f_c, f_w)\}$$

Donde

1- f_c fracción expuesta promedio del suelo, la cual no se encuentra cubierta (o sombreada) por la vegetación.

f_w fracción promedio de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia.

El f_w se determina midiendo la anchura de la banda mojada por la cinta de goteo. En una medida previa en el sistema de riego empleado, se obtuvo un valor de 0,35 - 0,4 m referida a un marco de 1,5 m resulta un valor de $f_w = 0,25$.

En el suelo desnudo se multiplica el valor obtenido por $(1 - (2/3) f_c)$ para considerar la reducción de la evaporación que se produce en el área humedecida por los emisores, que a su vez es sombreada por el cultivo.

En el caso del suelo acolchado, donde las únicas pérdidas de evaporación bajo el plástico se producen a través de los agujeros del trasplante f_w se multiplicó por 0,04. Se consideró además que debido a la anchura de la banda acolchada no hay humectación del riego fuera de la misma.

2.5.2. Lluvia efectiva

Puesto que no toda la lluvia que se produce durante el cultivo puede ser aprovechada por las plantas, en la programación del riego se tuvo en cuenta la precipitación efectiva (Pef.), que es aquella fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas. Depende de múltiples factores como pueden ser la intensidad de la precipitación o la aridez del clima, y también de otros como la inclinación del terreno, contenido en humedad del suelo o velocidad de infiltración.

Existen diferentes métodos para determinar la precipitación aprovechable por el cultivo o lluvia efectiva. En este trabajo se consideró precipitación efectiva a lluvias mayores a 10 mm en procesos aislados de este fenómeno, y aquellas cuyo valor acumulado en tres días seguidos sea mayor de 15 mm.

Para calcular el valor de la lluvia se corrigió en función del sistema de suelo y el grado de desarrollo del cultivo. En suelo desnudo este dato se multiplicó por un factor 0,6 (para considerar el porcentaje de anchura de la meseta en el marco del cultivo) cuando la fracción de suelo cubierto fue menor del 30% ($f_c < 0,3$) y por 0,2 cuando se superó el 30% del suelo cubierto y parte de la lluvia podía perderse en forma de evaporación desde la superficie de las hojas. En el suelo acolchado, el dato de lluvia se multiplicó por 0,05 cuando la fracción de suelo cubierto fue menor del 30% ($f_c < 0,3$) para tener en cuenta el efecto embudo de las plantas a través de los orificios del plástico, y por 0,3 ($0,25 + 0,05$) cuando se superó el 30% de suelo cubierto para considerar la aportación de agua en los laterales del acolchado (dos bandas de 20 cm equivalentes al 25% del marco de cultivo) y a través de los agujeros (0,05).

2.5.3. Eficiencia en el uso del agua

En general se entiende por “eficiencia” la relación existente entre un producto (producción, biomasa, etc.) y algunos de los factores que intervienen en su formación (agua, nutrientes, etc.). En este trabajo, se calculó la eficiencia en el uso del agua respecto al rendimiento (EUAr) como la relación entre la producción comercial obtenida y el volumen total de agua aplicado al cultivo (precipitación + riego).

Se obtendrá mayor eficiencia cuanto mayor sea la producción comercial o cuanto menor sea el volumen de agua aplicado al cultivo.

2.5.4. Integral térmica

Cuando la tasa de crecimiento de un organismo está controlada principalmente por la temperatura, su desarrollo puede caracterizarse utilizando el sistema de integral térmica (IT).

El concepto de integral térmica se refiere a las unidades de calor que un organismo requiere para completar una parte o la totalidad de su crecimiento o desarrollo. Este sistema asume que:

- Existe una temperatura de base (umbral inferior) por debajo de la cual el organismo no crece o crece muy lentamente.
- Por encima de la temperatura base, la tasa de crecimiento se incrementa con la temperatura.
- El crecimiento y el desarrollo están relacionados estrechamente con la acumulación de temperatura por encima de la temperatura base.
- Existe una temperatura umbral superior por encima de la cual el organismo no crece o crece muy lentamente.

Cada fase del desarrollo requiere un mínimo de acumulación de temperatura para llegar a su término y que la planta pueda pasar a la fase siguiente. En efecto, la planta "mide" la temperatura cada día y agrega el promedio de ese día a un total requerido para esa fase. Este total se llama tiempo térmico o suma de calor y las unidades térmicas son grados/días ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$). Se puede calcular sumando las temperaturas medias de cada día durante la fase en cuestión.

En el ensayo se utilizó la integral térmica en base 10, es decir, se fijó la temperatura de 10°C como cero vegetativo considerando como temperaturas eficaces las superiores a dicho valor.

2.5.5. Modelo de programación del riego. Hoja de cálculo

Toda la información referente a variables climáticas, coeficientes de cultivo, cálculo de ET_c , precipitación efectiva, datos de cobertura y altura, estado fenológico, lectura de contadores y fertirrigación, se recogió en una hoja de cálculo para la automatización de la programación de riego. Este cálculo fue desarrollado en una hoja de cálculo de Excel y permite determinar la evapotranspiración de un cultivo, en este caso tomate, basándose en el método dual ($K_c = K_{cb} + K_e$) propuesto en el documento FAO 56 (Allen et al., 2006) según el modelo de programación de riego desarrollado en el SIDTA (Ibáñez, 2011).

Para ello utiliza una serie de variables climáticas iniciales (temperatura media, humedad relativa mínima, precipitación, ET_o y velocidad del viento), que se toman diariamente de la estación "Valdegón" de la red de estaciones agroclimáticas del SIAR (www.larioja.org/siar).

A partir de los datos de lluvia, se calcula la lluvia efectiva en función de las premisas descritas anteriormente. Las necesidades del cultivo se calculan restando la lluvia efectiva a la ET_c calculada.

Para programar el tiempo de riego, se precisa la dosis real que proporciona el sistema de riego ($l/m^2 \cdot h$). Este es un dato que procede de la lectura de los contadores y se introduce el día en que se programa. En nuestro caso la programación se ha realizado dos veces por semana.

A partir de las necesidades y de las dosis de riego, el programa calcula el tiempo de riego para el período correspondiente. Este período corresponde al comprendido entre dos programaciones, por ello se hace el promedio de las necesidades de los días del periodo.

La hoja de cálculo contiene las fechas desde el trasplante (10 de mayo) hasta la cosecha (28 de agosto).

2.6. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO.

2.6.1. Método directo: gravimetría

Se realizaron 4 muestreos para conocer la humedad gravimétrica del suelo a lo largo del cultivo. Se tomó una muestra por tratamiento y repetición a 0,15 m y 0,5 m de profundidad.

Las muestras se pesaron en fresco y tras secarse en estufa de aire a $105^\circ C$ hasta peso constante se calculó la humedad gravimétrica. Para obtener la humedad volumétrica a partir de este dato se determinó la densidad aparente.

Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen. Este volumen es el que ocupa la muestra en el campo. La densidad del suelo se ve afectada principalmente por dos razones, la relación aire-agua en los poros (humedad) y la disminución del volumen total de los poros (compactación).

$$\rho = m/v$$

La densidad aparente en este ensayo se determinó mediante un método de medida directa de la masa y el volumen: método del cilindro.

Las muestras de suelo se recogieron a dos profundidades, 15 y 50 cm, mediante un cilindro de paredes delgadas y rígidas cuyas dimensiones fueron las siguientes: diámetro: 4,9768 (cm), altura: 5,0890 (cm) y volumen del anillo: 100 (cm³).

El método consiste en tomar muestras clavando los cilindros en el horizonte a estudiar. Para facilitar la toma de muestras se realizó una excavación o calicata, se determinó la altura de los horizontes a muestrear y se introdujeron los cilindros completamente en el suelo. Los filos externos del cilindro deben ser biselados o cortantes. Se extrajeron los cilindros con las muestras contenidas en ellos y con la ayuda de una espátula o cuchillo se cortó el suelo sobrante hasta llegar al nivel de los bordes del cilindro metálico. Se transfirieron las muestras a unos envases previamente pesados, se pesaron las muestras y se llevaron al horno para secarlas. Una vez secas, se procedió a pesarlas de nuevo.

Para calcular la densidad aparente se relacionó el peso seco de suelo (peso seco total – tara del cilindro correspondiente) con un volumen conocido, en este caso, del cilindro muestreador.

En cada punto de muestreo se recogieron tres repeticiones por profundidad. En la figura 4 se sitúan los puntos de toma de muestras en la parcela.



Figura 4: Esquema de situación de los puntos de muestreo de densidad aparente.

Como resultado del muestreo a 15 y 50 cm de profundidad se obtuvo una densidad aparente de 1,39 y 1,44 g/cm³ respectivamente.

2.6.2. Métodos indirectos: sensores de humedad

El seguimiento de la humedad del suelo se llevó a cabo mediante el uso de dos tipos sensores basados en diferentes tecnologías que permitieron determinar la humedad del suelo:

- **Sensores Ech₂o-10HS.** Decagon; Pullman, WA-USA. Sensores de tipo capacitivo FDR. Estos sensores constan de dos placas de un material conductor separadas por una pequeña distancia y miden el contenido de agua en el suelo a partir de la constante dieléctrica del mismo. Sus lecturas se expresan en Contenido Volumétrico de Agua en el suelo (VWC) (m³ de agua/m³ de suelo). La temperatura y conductividad eléctrica (CE) son los factores que más afectan a las medidas de humedad del suelo, pero el circuito de las sondas Ech₂o minimiza el efecto de los cambios de temperatura y su recubrimiento minimiza los de la salinidad.
- **Sensores Watermark.** Irrrometer; Riverside, CA-USA. Sensores de Matriz Granular (GMS). Determinan el potencial o nivel energético de agua en el suelo, importante para las plantas porque indica la fuerza necesaria para la extracción del agua del suelo. El sensor Watermark es un dispositivo resistivo que responde a cambios en la humedad del suelo. El principio de funcionamiento es la medida de la resistencia eléctrica entre dos electrodos separados por un bloque de matriz porosa que se instala en el suelo pasando a formar parte de la dinámica de movimiento de agua en el suelo.

Los sensores capacitivos (FDR) Ech₂o-10HS se eligieron por tener un nivel de prestaciones similares a las proporcionadas por los sensores TDR pero a un coste mucho menor. El diseño es robusto y de larga duración para monitorizar a largo plazo. Según el fabricante la instalación es sencilla a cualquier profundidad y orientación en el perfil del suelo. Además, estos sensores ya están precalibrados para usarse en una amplia gama de tipos de suelo y a partir de los datos procedentes de los sensores sin calibrar es posible establecer los límites de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez y/o humedad mínima aceptable que son los valores necesarios para establecer la estrategia de riego (Decagon Devices, 2008). Aunque hay que tener en cuenta que los sensores FDR exploran un volumen de suelo limitado y su medida se ve influenciada por las condiciones del suelo situado en su inmediata proximidad (Huete et al, 2010).

Los sensores de matriz granular (GMS) Watermark se eligieron porque proporcionan datos directos del potencial matricial del suelo sin necesidad de calibración, por su fácil manejo y con menor mantenimiento que los tensiómetros. Además presentan la ventaja sobre los bloques de yeso tradicionales de que el material poroso no se disuelve en agua y la distribución del tamaño de poro de esos sensores no cambia con el tiempo, por lo que duran mayor tiempo. El valor de la tensión se obtiene empleando una ecuación de

calibración que relaciona el valor de la resistencia eléctrica del bloque con la tensión matricial del suelo. Se debe considerar que la lectura proporcionada en el intervalo de -10 a -70 cb los sensores ofrecen un buen funcionamiento pero, por encima de esos valores no diferencian bien entre capacidad de campo y saturación y por debajo su precisión es muy escasa como se ha observado en ensayos previos (Huete et al, 2010). Además, la tensión debe ser interpretada cuidadosamente de acuerdo a las propiedades del suelo.

En cada tratamiento se estableció una estación de medida con dos sensores de cada tipo, a 0,15 y 0,5 m de profundidad, en la línea central de cada repetición de cada tratamiento. Al tratarse de riego por goteo, los sensores se colocaron a una distancia paralela a la cinta de goteo de 0,1 m. Los sensores se conectaron a un sistema de registro de datos (datalogger) y la información se descargó a un ordenador mediante equipos para la transmisión remota de datos (vía telefonía móvil). Los datos se registraron cada cinco minutos y en el ordenador se descargó la media de datos horarios y diarios.

2.6.2.1 Sensores Ech₂o: instalación

Al realizar la instalación en suelo agrícola se debe afectar lo menos posible al terreno circundante. Por ello se tomaron las medidas necesarias para abrir zanjas del tamaño más pequeño posible que permitieran realizar los trabajos correspondientes dentro de ellas. Es importante reducir al mínimo el movimiento de personas y máquinas alrededor de la zona de trabajo para no variar las condiciones del suelo a medir con respecto a su entorno.



Figura 5. Instalación de los sensores Ech₂o.

El objetivo principal al realizar la apertura de la zanja es extraer la tierra en diferentes estratos de 15 a 20 cm de profundidad, almacenando la tierra en recipientes, de manera que a la hora de rellenar la zanja se sitúe la tierra en el mismo lugar, compactando suavemente estrato a estrato.

Los sensores se instalaron mediante una “espátula” diseñada al efecto, del tamaño del sensor, que se inserta en el terreno inalterado, en un lateral de la zanja, y al sacarla deja un espacio en el que se sitúa el

sensor (figura 5). De esta forma se asegura un buen contacto y se evitan bolsas de aire y la compactación excesiva del suelo alrededor de los sensores para obtener lecturas más representativas del suelo.

2.6.2.2. Sensores Watermark: Instalación

Estos sensores no requieren realizar ningún tipo de zanja para su instalación, con lo cual ésta se simplifica. Para la ejecución del agujero se utilizó una barrena con diámetro mayor que el del sensor a instalar. El sensor se introdujo en el suelo en el punto indicado hasta alcanzar la profundidad deseada, empleando una cinta métrica para este fin. Es importante mantener el mayor grado de verticalidad posible.

Para conseguir buen contacto entre el suelo y el sensor y que de esta manera el sensor proporcionara datos óptimos se realizó una pasta viscosa, mezclando tierra tamizada de la misma superficie con agua hasta conseguir una buena homogeneidad, y se vertió en el agujero. Acto seguido se instaló el sensor con especial cuidado de no dañarlo al rayarlo contra los laterales en su inserción, ayudándonos de una varilla, y se rellenó el agujero con el barro. Se dejó accesible el cable por encima del terreno que se conectó al datalogger.

Los sensores pueden utilizarse varias temporadas si se les presta el cuidado apropiado; por lo tanto, se deben limpiar y secar bien antes de guardarlos. Sin embargo, los sensores deben revisarse antes de instalarlos nuevamente. La revisión consiste en comprobar que se humectan y secan adecuadamente. Para ello se colocan dentro de un recipiente con agua y se observa que los sensores sumergidos se humecten correctamente, indicando valores en el medidor portátil entre 0 y 5 cb, ya que la succión del medio disminuye al aumentar la humedad. Si la lectura es mayor que 5 cb, se deben descartar. Este proceso de comprobación debe completar 3 ciclos de humectación – secado asegurándose de que la lectura en el momento correspondiente proporcione un valor adecuado. Para ello se utiliza el medidor Watermark que correlaciona la resistencia a centibares (cb) de tensión de agua en función de la temperatura y mide la humedad en un rango de 0 a - 200 centibares.

2.6.3. Balance de agua en el suelo

Siguiendo la metodología descrita en FAO 56 se realizó un balance diario, a la profundidad radicular alcanzada cada día, para modelizar la humedad del suelo y el drenaje a lo largo de la campaña.

En la figura 6 se representan las variables que hacen fluctuar la cantidad de agua en la zona radicular, necesarias para calcular el balance diario de agua en suelo. A continuación se describen las principales variables.

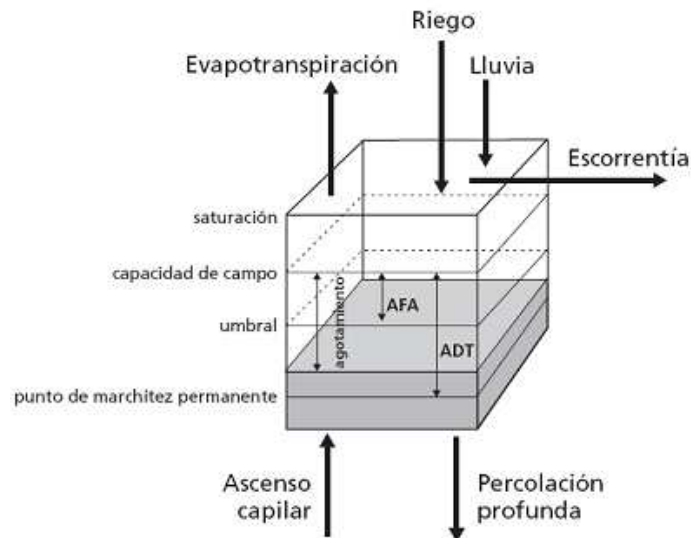


Figura 6. Balance de agua en la zona radicular.

- **Agua disponible total (ADT):** Representa la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular y cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular. Debido a que contenidos de humedad por encima de capacidad de campo no pueden ser retenidos en contra de las fuerzas de gravedad y son drenados y debido a que contenidos de humedad por debajo del punto de marchitez permanente no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, el total de agua disponible en la zona radicular es la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$ADT = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r$$

Donde

ADT agua disponible total en la zona radicular del suelo (mm).

θ_{FC} contenido de humedad a capacidad de campo ($m^3 m^{-3}$).

θ_{WP} contenido de humedad en el punto de marchitez permanente ($m^3 m^{-3}$).

Z_r profundidad de las raíces (m).

- **Agua fácilmente aprovechable (AFA):** En teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, pero la cantidad de agua extraída por el cultivo se reduce significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. Cuando el contenido de humedad del suelo está por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no puede ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comienza a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo:

$$\text{AFA} = p \text{ ADT}$$

Donde

AFA: agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm).

p: fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) (0 – 1).

El valor de p expresa la tolerancia de los cultivos al estrés hídrico por lo que depende del cultivo y existen valores tabulados. Para tomate, p tabulado = 0,40. Para ajustar el valor de p de acuerdo a la tasa de ETc se considera la siguiente aproximación numérica: $p = p \text{ tabulado} + 0,04 (5 - \text{ETc})$ donde el valor ajustado de p es limitado a $0,1 \leq p \leq 0,8$ y el valor de ETc es en mm día⁻¹.

El sistema formado por el suelo y el cultivo tiene unos aportes y unas salidas de agua por lo que el contenido de humedad del suelo irá cambiando. La lluvia y el riego son procesos que añaden agua a la zona radicular y disminuyen el agotamiento de humedad en la zona radicular. Por otra parte, los procesos de evaporación, transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación remueven agua de la zona radicular y aumentan el agotamiento de la humedad del suelo. El balance diario del agua en la zona radicular del suelo, expresado en términos de agotamiento al final del día, es por lo tanto:

$$\text{Dr}_{,i} = \text{Dr}_{,i-1} - P_i - I_i + \text{ETC}_{,i} + \text{DP}_i$$

Donde

$\text{Dr}_{,i}$: agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i (mm) ($0 \leq \text{Dr}_{,i} \leq \text{ADT}$)

$\text{Dr}_{,i-1}$: contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, i-1 (mm).

P_i : precipitación en el día i (mm).

I_i : lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo (mm).

$\text{ETC}_{,i}$: evapotranspiración del cultivo en el día i (mm).

DP_i : pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i (mm).

De esta forma podemos realizar un balance de agua y calcular la reserva del suelo diaria como la diferencia entre la capacidad de campo y el agotamiento (figura 6).

Para el cálculo de $\text{Dr}_{,i}$ se tienen en cuenta los siguientes conceptos:

- **Agotamiento Inicial ($\text{Dr}_{,i-1}$):** Para iniciar el balance de humedad, es necesario estimar el agotamiento inicial $\text{Dr}_{,i-1}$. El agotamiento inicial puede ser estimado a través de mediciones del contenido de humedad del suelo de la siguiente forma:

$$\text{Dr}_{,i-1} = 1000(\theta_{\text{FC}} - \theta_{i-1}) Z_r$$

Donde

θ_{i-1} : es el contenido de humedad promedio en la profundidad efectiva de la zona radicular.

Después de una lluvia pesada o riego, se puede asumir que el contenido de humedad en la zona radicular está cerca de la capacidad de campo, es decir, $Dr_{i-1} \approx 0$.

En nuestro caso dado que la humedad del suelo inicial era muy baja se consideró que el valor θ_{i-1} al inicio del balance era el valor del punto de marchitez.

- **Percolación profunda (DP_i):** Después de una lluvia pesada o riego, el contenido de humedad en la zona radicular puede exceder la capacidad de campo. De acuerdo a este procedimiento sencillo, se asume que el contenido de humedad en el suelo es el de capacidad de campo durante el mismo día que ocurra el evento de humedecimiento, por lo que el agotamiento Dr_{i-1} es igual a cero. Por lo tanto, después de una lluvia pesada o riego:

$$DP_i = P_i + I_i - ET_{c,i} - Dr_{i-1} \geq 0$$

En el momento que el contenido de humedad en la zona radicular se encuentra por debajo de capacidad de campo (es decir, $Dr_{i-1} > 0$), no existe drenaje en el suelo y $DP_i = 0$.

Los valores de capacidad de campo y punto de marchitez necesarios para la realización del balance se determinaron mediante las funciones de edafotransferencia descritas por Saxton et al. (2006), y los valores medios obtenidos para un perfil de 0,60 m de profundidad han sido 0,34 y 0,19 m^3/m^3 respectivamente.

2.7. DESARROLLO DEL CULTIVO Y PRODUCCIÓN

A lo largo del cultivo se realizaron medidas de cobertura, altura y biomasa. Con estos parámetros se observó el ritmo de crecimiento del cultivo, además de la cantidad de materia seca que se produjo en función de la cantidad de agua aplicada mediante el riego.

2.7.1. Cobertura y altura del cultivo

Para determinar el grado de recubrimiento del suelo por el cultivo se realizaron fotografías semanales con una cámara digital comercial de los diferentes tratamientos, una por cada repetición, desde el trasplante hasta alcanzar aproximadamente el ochenta por ciento de suelo cubierto.

Mediante el software libre GIMP 2.6.0., se efectuó un tratamiento de las imágenes para convertir los colores que aparecían en ellas en colores primarios (RGB): rojo, verde y azul. Además el procesador proporciona el

porcentaje de píxeles de color verde (correspondiente a la superficie ocupada por las plantas) sobre el total, de modo que se obtuvo un valor de la cobertura.

Para convertir los valores de cobertura de las fotografías a los valores reales en el campo, se utilizó una regla de longitud conocida que se fotografía junto con las plantas. La fórmula de conversión es la siguiente:

$$Cr(\%) = \left(\frac{Cf \cdot Af \cdot Lrregla}{Lfregla \cdot Marco} \right)$$

Donde:

Cr: cobertura real (%).

Cf: cobertura de foto (%).

Af: anchura de la foto (mm).

Lr regla: longitud real de la regla (m)

Lf regla: longitud de regla en foto (mm)

Marco: distancia entre líneas de cultivo (m)

En la figura 7 se puede ver, a modo de ejemplo, una muestra de la fotografía original utilizada para determinar la cobertura y el resultado una vez procesada. En el caso del ejemplo la cobertura del cultivo es del 30%. Puede observarse la regla utilizada para dar escala a la fotografía.

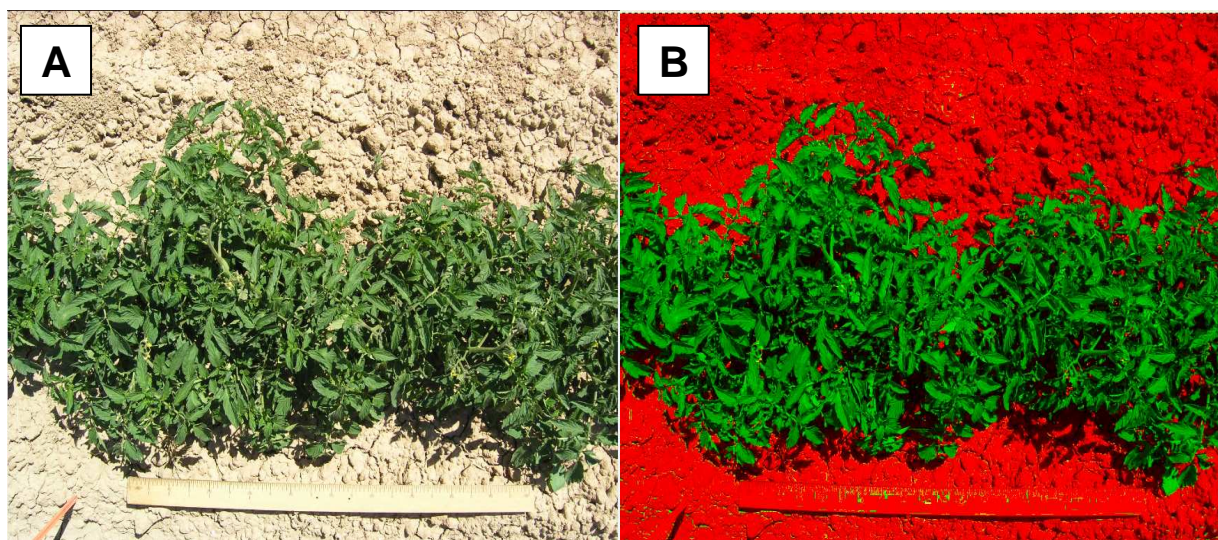


Figura 7. Imagen digital de plantas de tomate en suelo desnudo a fecha de 15/06/2012 (A). Imagen procesada en falso color (B). Detalle final imagen (C). (Regla: 1 m).

Los valores de la altura del cultivo se tomaron simultáneamente a los datos de cobertura del suelo. La altura de cada tratamiento se obtuvo como el valor promedio de la altura medida con regla, de 5 plantas de la fila central de cada repetición correspondiente a cada tratamiento.

Estos valores se emplearon para actualizar el cálculo en las funciones de cobertura y altura en función de la IT, empleadas para calcular diariamente la Kcb empleada en el modelo de programación de riego para el cálculo de la ETc.

2.7.2. Biomasa

Para determinar la biomasa, se controló la evolución de la materia seca de las plantas en cada repetición correspondiente a cada tratamiento. Para ello se tomaron muestras en el momento del trasplante, al alcanzar el 20% del suelo cubierto por el cultivo, al alcanzar el 60%, en el estado de máximo desarrollo vegetativo y en cosecha. En el momento del trasplante se tomaron 10 plantas de la bandeja del cepellón y en los muestreos posteriores se recogieron 3 plantas por cada repetición del correspondiente tratamiento de riego. En todos los casos se determinó el peso de las hojas y tallos, y de los frutos (en el caso de que los hubiera) y el correspondiente peso seco tras secar en estufa en aire caliente a una temperatura de 65°C hasta peso constante.

2.7.3. Maduración

A partir de la observación de los primeros frutos maduros se realizó un seguimiento semanal de la maduración de los frutos para cambiar el coeficiente de riego y determinar el momento del corte de riego y de la cosecha. En cada muestreo se tomaron 3 plantas por repetición de los diferentes tratamientos y se controló el peso de los frutos verdes y maduros.

2.7.4. Cosecha y calidad de la cosecha

La recolección se realizó al superarse el 80% de frutos maduros en cada tratamiento. Se cosechó una superficie de 9 m² en cada repetición, controlándose el número y peso de frutos maduros, verdes y destrío.

La calidad de la cosecha se controló en los frutos recién recolectados mediante el análisis de pH, acidez titulable, sólidos solubles, sólidos totales o materia seca, y la consistencia Bostwick.

Los análisis de composición de los tomates se realizaron en el laboratorio de calidad del S.I.D.T.A. según los procedimientos del manual de métodos de análisis (AOAC, 1970) sobre una muestra compuesta por 6–9 tomates, sanos y maduros de cada repetición y tratamiento. Los tomates se trituraron con una picadora comercial durante dos minutos y de este triturado se tomaron las porciones necesarias para la realización de cada uno de los análisis.

Los sólidos totales o materia seca se determinaron pesando 10 g de triturado en cápsulas de cerámica previamente taradas, y secando en estufa de vacío a 40 – 50 °C hasta peso constante. El peso del residuo seco se expresó como porcentaje respecto a 100 g de materia fresca.

Para determinar el pH y la acidez titulable se pesaron 10 g de triturado y se le añadieron 100 cm³ de agua destilada. Sobre esta mezcla se midió directamente el pH con pHmetro (CRISON mod.2002). Posteriormente se valoró con NaOH 0,1 N hasta pH 8,1 expresando el resultado en % de ácido cítrico (= (ml NaOH 0,1 N · N/0,1N)·0,06404).

Los sólidos solubles se determinaron sobre el jugo extraído al filtrar el triturado de tomate a través de tela de Nylon y centrifugar 10 minutos a 5000 r.p.m. Se colocaron unas gotas de este jugo en un refractómetro digital ATAGO DBX – 55 y el resultado se expresó como ° Brix.

La consistencia se midió con el consistómetro Bostwick (Kramer y Twigg, 1970). Para su determinación se vertió el tomate recién triturado en el consistómetro y se dejó deslizar durante 30 segundos, midiendo a continuación la distancia recorrida.

En Kramer (1973) encontramos una descripción detallada de los métodos empleados para la determinación de la calidad del fruto en tomate.

2.8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El análisis de medidas fisiológicas en planta, de resultados de cosecha y calidad de la misma, el volumen de riego aplicado por etapa del cultivo y de la eficiencia en el uso del agua se realizó con un análisis de la varianza, ANOVA, y en el caso de detectarse un valor significativo de F se procedió a la comparación de medias aplicando el test de Tukey. En ambos análisis se utilizó el módulo GLM del paquete Systat® 12.0.

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1- COBERTURA Y ALTURA DEL CULTIVO

Los resultados mostraron mayor precocidad de los tratamientos con acolchado plástico que el tratamiento en suelo desnudo, y a lo largo del ciclo alcanzaron porcentajes de cobertura mayores. En la figura 8 se representa el porcentaje de cobertura de cada tratamiento durante la campaña. Aparece también el resultado del tratamiento estadístico, para analizar la existencia de diferencias entre los diferentes tratamientos, para cada fecha.

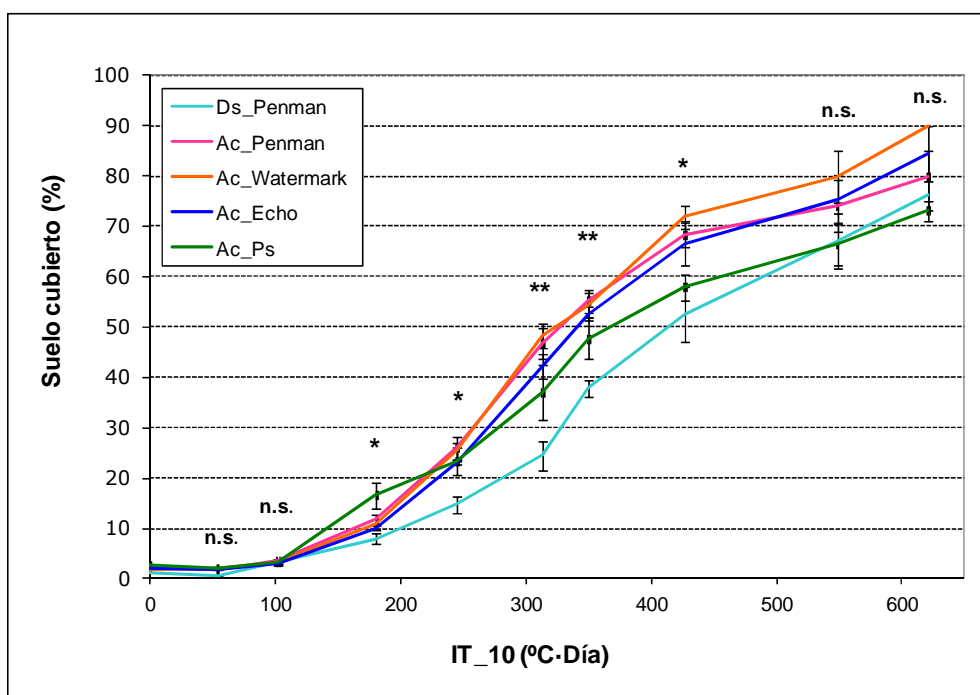


Figura 8. Evolución de la cobertura del suelo por el cultivo en función de la integral térmica IT10 (°C·Día) de los diferentes tratamientos durante la campaña 2012. Significación ($p < 0,05$)*; ($p < 0,01$)**; ($p < 0,001$ ***); n.s.: no significativo.

La diferencia entre tratamientos con acolchado y suelo desnudo fue significativa en el período comprendido desde el 10% hasta un 70% de suelo cubierto, donde se observó que el 50% de cobertura en los tratamientos con acolchado plástico se alcanzó el día 170 cuando se acumularon 350°C Día y en el tratamiento en suelo desnudo se alcanzó siete días después cuando se acumularon 427°C Día. Al final del periodo de crecimiento los tratamientos se igualaron y a partir de los 550°C Día no hay diferencias entre los tratamientos acolchados y el desnudo, alcanzando el 82% y el 76% de cobertura respectivamente.

En la figura 9 se representa el modelo que simula el desarrollo en función de la integral térmica que está implementado en el modelo basado en FAO 56 para la determinación de la ETC, y los valores de los tratamientos en suelo acolchado y del tratamiento en suelo desnudo.

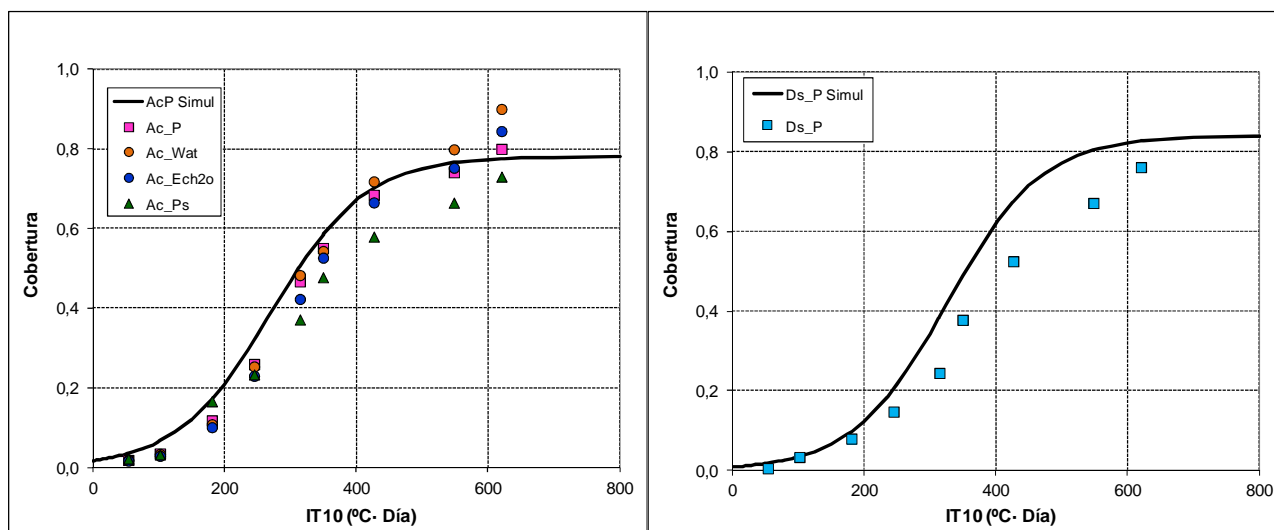


Figura 9. Ajuste de los tratamientos en suelo acolchado y desnudo a un modelo de curva que simula la cobertura en función de la integral térmica (IT_{10}).

Los datos de altura de las plantas mostraron resultados similares a los de cobertura del cultivo. Los tratamientos en suelo acolchado presentaron mayor precocidad que el tratamiento en suelo desnudo, alcanzando a lo largo del ciclo valores de altura mayores. En la figura 10 se representan los datos de altura de las plantas de los cinco tratamientos, que fueron tomados periódicamente para programar el riego y analizar la evolución de dicha variable y ver su comportamiento con la cobertura del cultivo.

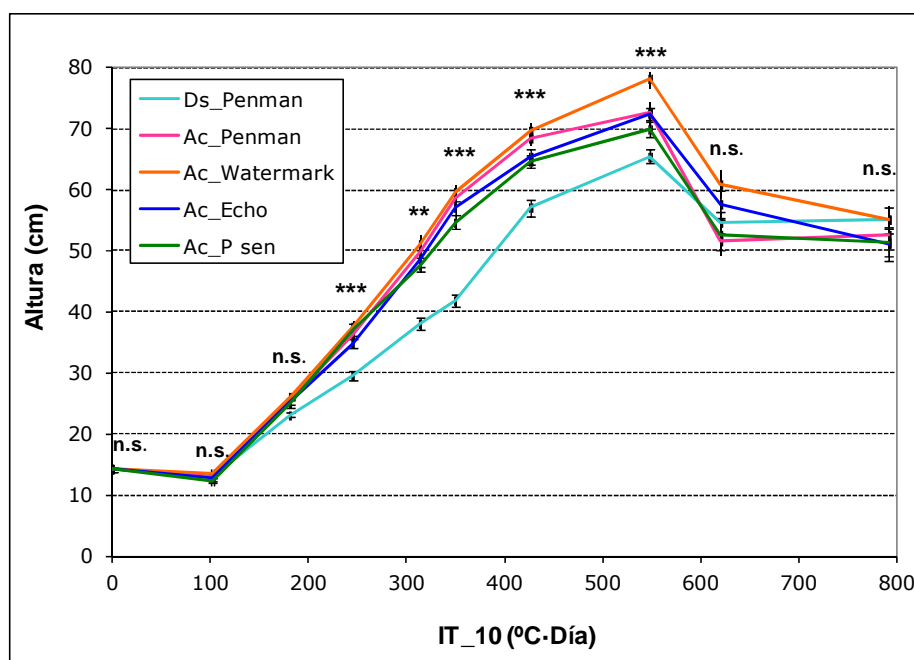


Figura 10. Evolución de la altura alcanzada por el cultivo en función de la integral térmica IT_{10} ($^{\circ}C \cdot D\acute{a}a$) de los diferentes tratamientos durante la campaña 2012. Significación ($p < 0,05$)*; ($p < 0,01$)**; ($p < 0,001$)***; n.s: no significativo.

Esta diferencia fue significativa en el rango de 20 a 70 cm de altura de las plantas, donde se observó que una altura de 50 cm en los tratamientos con acolchado plástico se alcanzó el día 167 cuando se acumularon 314°C Día y en el tratamiento en suelo desnudo se alcanzó siete días después cuando se superaron los 350°C Día. Al final del periodo de crecimiento, los tratamientos se igualaron y a partir de los 550°C Día no hubo diferencias entre los tratamientos acolchados y el desnudo, alcanzando como media 65 cm y 73 cm de altura respectivamente. Una vez alcanzada la altura máxima, se observa como la variable disminuyó debido al peso de los frutos que ocasionan sobre la planta.

3.2.- BIOMASA

Los resultados de biomasa obtenidos durante la campaña mostraron que no hubo diferencias significativas entre tratamientos en ninguna de las fechas de muestreo (figura 11). Se observó una disminución de la biomasa entre el día 30/07/2012 y la siguiente, realizada el día 14/08/2012. La primera fecha coincide con el momento en el que se alcanzó el máximo desarrollo del cultivo y el inicio de la maduración de frutos, 11% y 5% en los tratamientos con acolchado y desnudo respectivamente. A partir de este momento la materia seca de hojas y tallos disminuyó y los frutos comenzaron a engrosar y madurar, aunque su materia seca no varió de forma importante (datos no mostrados).

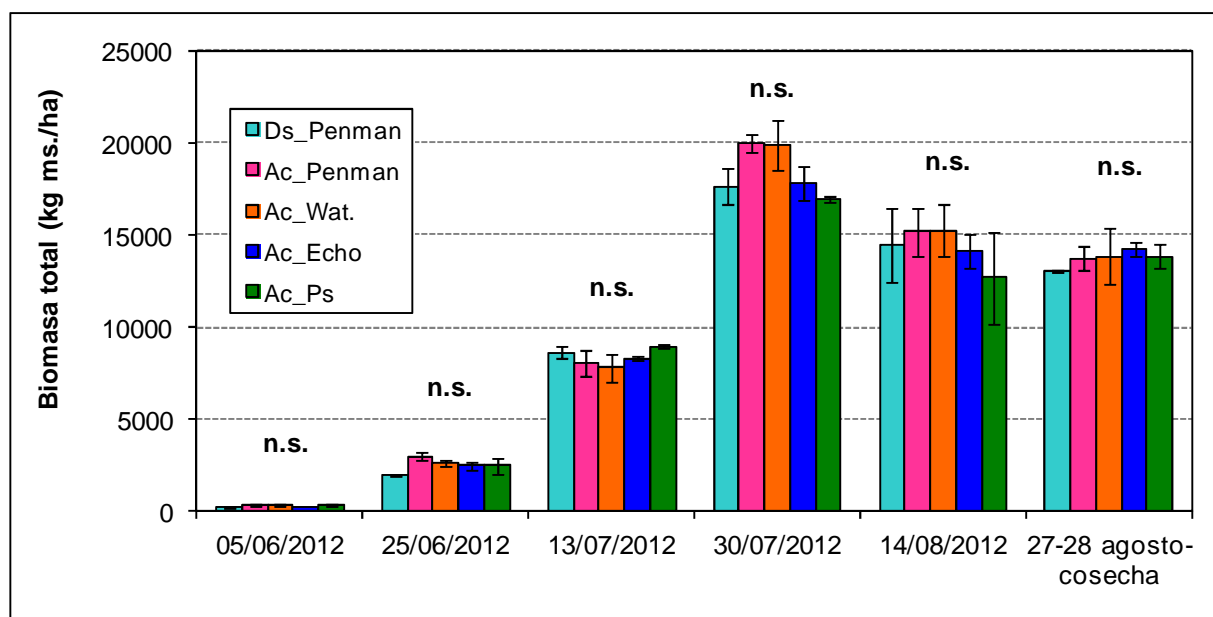


Figura 11. Evolución de la biomasa producida ($\text{kg de materia seca}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los diferentes tratamientos durante la campaña 2012. Significación ($p<0,05$)*; ($p<0,01$)**; ($p<0,001$ ***); n.s: no significativo.

En el momento de la cosecha los datos de biomasa reflejaron diferencias significativas entre tratamientos en la biomasa de hojas y tallos, mientras que los resultados de la biomasa de frutos fueron similares (tabla 7).

Tabla 7. Biomasa producida (kg materia seca·ha⁻¹) en los diferentes tratamientos en suelo acolchado y desnudo en el momento de la cosecha.

Tratamiento	Kg ms · ha ⁻¹		
	Hojas + Tallos	Frutos	Total
Ds_P	4775 ab	8244	13020
Ac_P	3864 a	9882	13746
Ac_Ps	5110 ab	8741	13851
Ac_Wat	5301 b	8551	13851
Ac_Echo	4942 ab	9295	14237
	*	n.s.	n.s.

Cifras seguidas de la misma letra no difieren significativamente en un test de Tukey ($\alpha < 0,05$). Significación ($p < 0,05$)*; ($p < 0,01$)**; ($p < 0,001$ ***); n.s: no significativo.

3.3-. EVOLUCIÓN DE LA MADURACIÓN DEL CULTIVO

En las figuras 12 y 13 se representan los porcentajes de madurez alcanzados en los diferentes tratamientos en cada fecha de muestreo y la evolución de la maduración del cultivo en función de la integral térmica en cada tratamiento respectivamente.

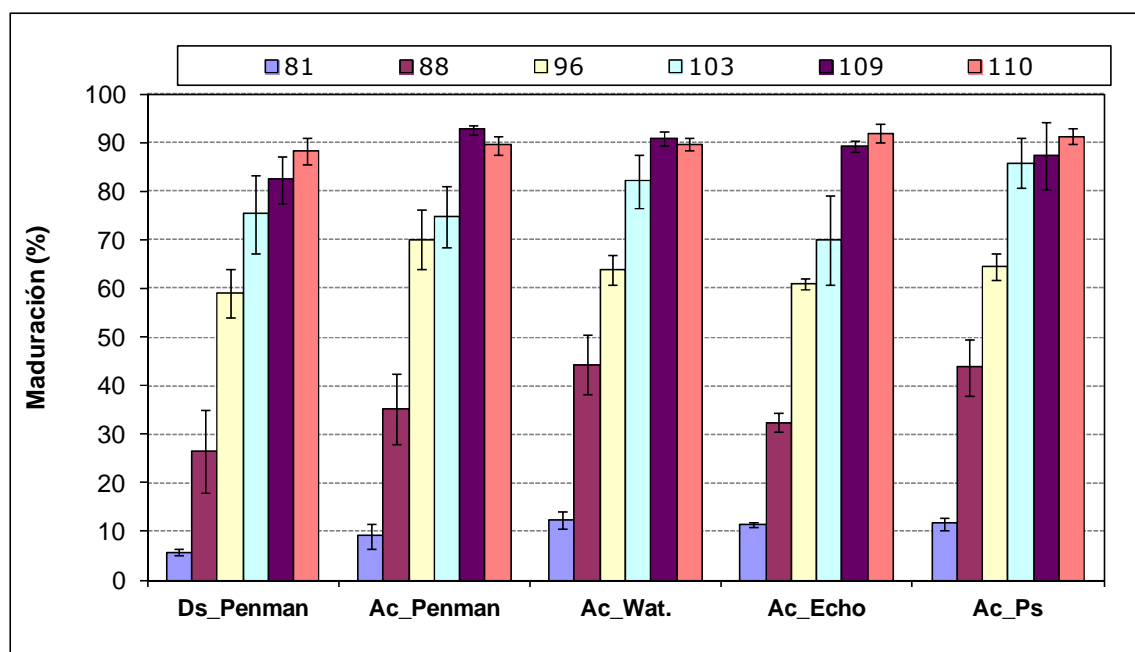


Figura 12. Porcentaje de madurez alcanzado por los diferentes tratamientos por fecha de muestreo.

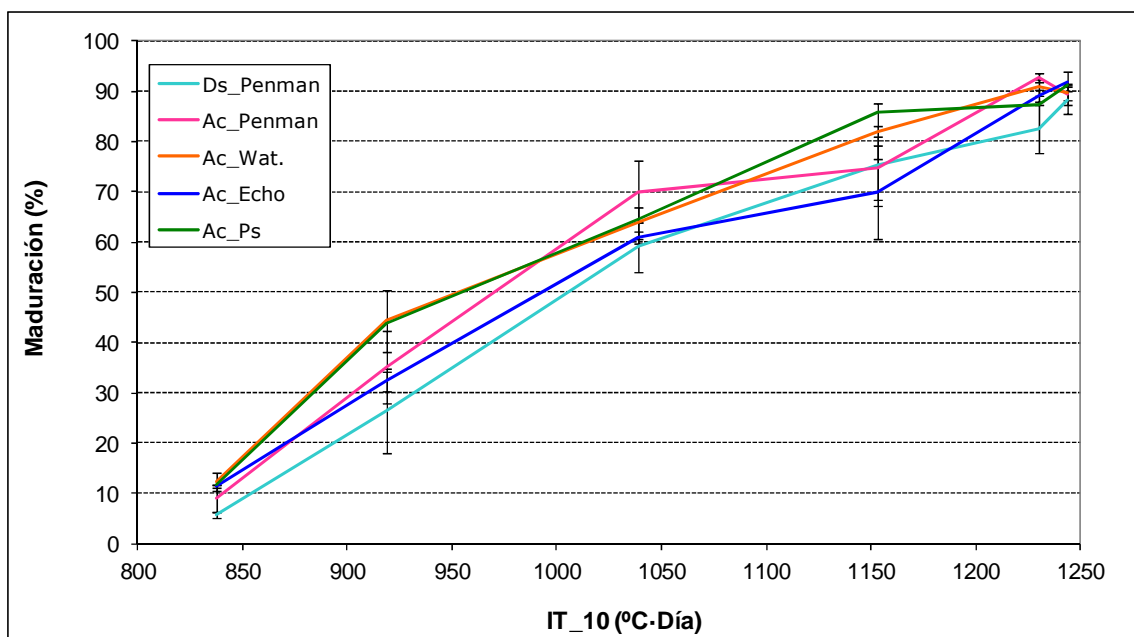


Figura 13. Evolución de la maduración del cultivo de tomate var. Vulcan en función de la integral térmica (IT_{10}).

El 50% de la maduración de frutos se alcanzó en el caso de los tratamientos con acolchado plástico con una integral térmica de $970^{\circ}\text{C} \cdot \text{Día}$, mientras que en suelo desnudo se alcanzó con $1010^{\circ}\text{C} \cdot \text{Día}$. Por ello se puede decir que la evolución de la maduración del cultivo reflejó cierta tendencia de precocidad de los tratamientos con acolchado frente al desnudo, aunque no se apreciaron diferencias significativas.

Al final del cultivo, la maduración fue similar en todos los tratamientos alcanzando aproximadamente el 90% de frutos maduros. Se produjeron entre un 2,5 y 4,5 % de frutos sobremaduros en los tratamientos en suelo desnudo y acolchado respectivamente.

3.4.- PRODUCCIÓN

3.4.1.- Cosecha

El ciclo medio del cultivo desde el trasplante hasta la cosecha, 110 días tanto para suelo acolchado como desnudo, estuvo de acuerdo a lo obtenido para este cultivo en ensayos de variedades de tomate de recolección única en Navarra en 2012, donde la duración del ciclo estuvo comprendida entre los 110 y los 130 días según la precocidad (Macua et al., 2012). En la tabla 8 se presentan los resultados medios de la cosecha comercial y total del ensayo en cada uno de los tratamientos establecidos.

Tabla 8. Resultados de la cosecha de tomate de la variedad Vulcan: número de frutos comerciales por planta ($n^{\circ}\cdot pl^{-1}$), peso del fruto comercial ($g\cdot fr^{-1}$), producción comercial ($t\cdot ha^{-1}$), madurez (%) y producción total ($t\cdot ha^{-1}$) en el momento de la cosecha de cada tratamiento.

	COSECHA COMERCIAL			MADUREZ	COSECHA TOTAL
	Frutos $n^{\circ}\cdot pl^{-1}$	Peso $g\cdot fr^{-1}$	Producción $t\cdot ha^{-1}$	%	Producción $t\cdot ha^{-1}$
Ds_P	69	54,2	114,36	89	132,47
Ac_P	71	58,2	133,64	90	153,48
Ac_Ps	62	56,2	116,41	90	135,41
Ac_Wat	74	56,5	136,86	92	153,11
Ac_Echo	77	54,5	137,03	91	154,35
	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Cifras seguidas de la misma letra no difieren significativamente en un test de Tukey ($\alpha<0,05$). Significación ($p<0,05$)*; ($p<0,01$)**; ($p<0,001$)***; n.s: no significativo.

Aunque en el ensayo no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a la producción obtenida, tanto comercial como total, se aprecia la tendencia de los tratamientos en suelo acolchados a producir mayor cantidad que en el tratamiento en suelo desnudo. El número de frutos por planta fue similar en todos los tratamientos con una cifra media de 71 frutos y un peso medio del fruto de 56 gramos. En trabajos desarrollados por Pardo et al. (2001) y Lahoz et al. (2007), en ensayos de tomate con acolchado plástico y riego por goteo, se observa mayor precocidad y rendimiento comercial en los tratamientos con suelo acolchado respecto a los de suelo desnudo. Además, este resultado ha sido apoyado por numerosas investigaciones que han atribuido al uso de acolchado plástico efectos favorables en precocidad y producción de la cosecha (Abdul-Baki et al., 1992; Siwek et al., 1994; Macua et al., 1999) beneficios, que afectan también al desarrollo del cultivo y a la calidad de los frutos, y que se atribuyen a las mejores condiciones de temperatura y humedad del suelo que tienen lugar bajo el acolchado plástico (Bhella, 1988a; Maiero et al., 1987; Wien y Minotti, 1988).

En el ensayo se obtuvo un rendimiento comercial medio de $128 t\cdot ha^{-1}$ (tabla 8). Según datos publicados en Navarra Agraria, el rendimiento medio obtenido en tomate de industria en Navarra en 2012 fue de $88 t\cdot ha^{-1}$, un 2,11% superior al año anterior (Macua et al, 2012). Por tanto, el rendimiento obtenido fue acorde a los valores habituales de cosecha comercial al igual que los obtenidos en ensayos de años anteriores en la zona que superaron las 100 t/ha (Macua et al., 2004; Vázquez, 2004).

3.4.2.-Calidad de la cosecha

Los resultados de los parámetros de calidad obtenidos tras la cosecha del tomate se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de los índices de calidad de la cosecha de tomate var. Vulcan en suelo acolchado (Ac) y desnudo (Ds): pH; Acidez (% Ác. Cítrico); Sólidos Solubles (°Brix); Materia Seca (%); Consistencia Bostwick (cm/30s).

	pH	Acidez (% Ác. Cítrico)	Sol. Solubles (°Brix)	Materia Seca (%)	Cons. Bostwick (cm/30 s)
Ds_P	4,46 ab	0,42	5,20	6,77 ab	9,60 a
Ac_P	4.41 a	0,41	5,53	7,30 b	9,33 a
Ac_Ps	4,50 ab	0,36	5,23	6,36 a	11,40 ab
Ac_Wat	4,48 ab	0,38	4,93	6,40 a	12,30 b
Ac_Echo	4,54 b	0,38	5,03	6,60 ab	11,80 ab
	*	n.s.	n.s.	*	*

Cifras seguidas de la misma letra no difieren significativamente en un test de Tukey ($\alpha < 0,05$). Significación ($p < 0,05$)*; ($p < 0,01$)**; ($p < 0,001$)***; n.s: no significativo.

Aunque se observó alguna diferencia significativa, los valores de los parámetros de calidad de la cosecha de tomate var. Vulcan se encontraron dentro de los rangos considerados adecuados para los frutos destinados a industria: el °Brix obtenido superó el valor de 4,5, valor mínimo recomendado, con una media del ensayo de 5,18; el porcentaje de ácido cítrico obtenido estuvo comprendido entre los valores recomendados de 0,35 y 0,40, con un valor medio de 0,39%; el valor medio de pH obtenido fue de 4,48, algo por encima de los valores recomendados situados entre 4,2 y 4,4, por lo que podría ser necesario la adición de acidulantes.

Los tratamientos de riego no tuvieron ninguna influencia sobre los parámetros medidos probablemente porque no hubo diferencias en el agua aplicada, en la dosis ni en los niveles de agua registrados por los sensores en el suelo.

3.5-. AGUA APLICADA.

Se consideraron dos periodos de riego: el periodo de trasplante, donde el riego se aplicó para asegurar el arraigo y supervivencia de las plantas trasplantadas y el periodo de cultivo donde el riego se aplicó en función de las necesidades calculadas para el cultivo. Los riegos se iniciaron el 9 de mayo con el riego de pretrasplante y finalizaron 6 días antes de la recolección. En la tabla 10 aparecen las necesidades del cultivo (calculadas por el modelo basado en el método de los coeficientes de FAO) y los volúmenes de agua aplicada en cada tratamiento.

Tabla 10. Necesidades hídricas, lluvia y riego aplicado en los diferentes tratamientos.

	Trasplante				Cultivo			
	ETc (mm)	Riego (mm)	Ptotal (mm)	Pútil (mm)	ETc (mm)	Riego (mm)	Ptotal (mm)	Pútil (mm)
Ds_P	27,9	47,3	19,5	10,1	557,1	542,2	40,4	0
Ac_P	11,8	47,0	19,5	0,8	496,1	535,1	40,4	0
Ac_Ps	11,8	47,9	19,5	0,8	496,1	484,0	40,4	0
Ac_Wat	11,8	47,9	19,5	0,8	496,1	483,3	40,4	0
Ac_Echo	11,8	47,6	19,5	0,8	496,1	487,1	40,4	0

Trasplante: desde 10 al 23 de mayo. Cultivo: desde fin trasplante al 28 de agosto.

En la etapa de trasplante se ajustó el volumen de agua de riego con la misma cantidad de partida para todos los tratamientos. Las pequeñas variaciones en la cantidad total de agua aplicada pudo ser debidas a los propios ajustes de presión y dosis de agua del sistema de riego empleado.

El agua aplicada por riego durante la etapa de cultivo fue menor en los tratamientos con suelo acolchado que en suelo desnudo. Dentro de los tratamientos con suelo acolchado, el tratamiento Ac_P presentó mayor cantidad de agua aplicada, debido a un desajuste de las dosis de riego provocado por la obturación de la cinta de goteo (figura 14). Hubiera sido esperable que el agua aplicada por riego fuera similar al tratamiento Ac_Ps, ya que fue una campaña con pocos eventos de lluvia y la programación de riego estuvo basada en el mismo cálculo de dosis teóricas a aplicar. Exceptuando el tratamiento Ac_P, se pudo observar que no hubo diferencias en el volumen total de riego aplicado entre los tratamientos con suelo acolchado, y fue un 11% menor que en suelo desnudo.

En los tratamientos pilotados con sensores, Ac_Wat y Ac_Ech₂O, los aportes de agua mediante el riego se ajustaron adecuadamente a la necesidades hídricas, pero en el periodo de máximo crecimiento vegetativo (hasta alcanzar el máximo desarrollo del cultivo, equivalente al 80% de suelo cubierto) aplicaron un 29% más de agua que los tratamientos regados mediante el modelo basado en el método de los coeficientes. Con ello se puede decir que la cantidad de agua calculada mediante el método FAO 56 fue menor de lo que el cultivo utilizó y para compensar ese déficit el cultivo extrajo el agua que había en el suelo. En cambio en la siguiente etapa de media estación (hasta alcanzar el 10% de frutos maduros) aplicaron un 23% menos (tabla 11).

En la etapa de final de temporada, comprendida desde el 10% de frutos maduros hasta la cosecha, el agua aplicada en los tratamientos con acolchado hasta el corte de riego fue prácticamente la misma.

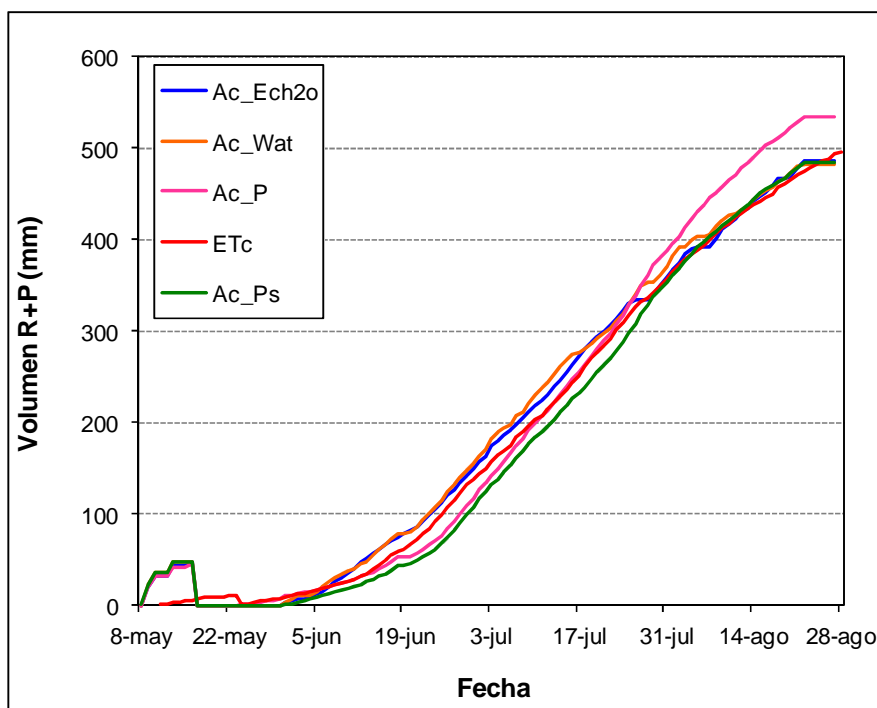


Figura 14. Agua acumulada con el riego y la precipitación (l/m^2) en los tratamientos con suelo acolchado y necesidades del cultivo (l/m^2).

Tabla 11. Volumen de agua aplicada a través del riego en los diferentes tratamientos por etapas de desarrollo.

VOLUMEN DE RIEGO POR ETAPA DE DESARROLLO (l/m^2)				
Fecha inicial	Inicial	Desarrollo del cultivo	Media estación	Final de temporada
Tratamientos	Trasplante (10/05 - 23/05)	Ini. riego - Máx. desar (24/05 - 05/07)	Máx. desar - 10%f.m. (06/07 - 31/07)	10%f.m.-Cosecha (01/08 - 28/08)
Ds_Penman	47,2	171,5 ab	206,8 b	163,9 b
Ac_Penman	46,9	149,2 a	231,2 c	154,8 b
Ac_Ps	47,9	138,3 a	208,4 b	137,4 ab
Ac_Wat	47,9	190,1 b	170,8 a	122,4 a
Ac_Echo	47,7	181,1 b	168,6 a	137,5 ab
	n.s	***	***	**

Cifras seguidas de la misma letra no difieren significativamente en un test de Tukey ($\alpha < 0,05$). Significación ($p < 0,05$)*; ($p < 0,01$)**; ($p < 0,001$)***; n.s: no significativo.

3.6-. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUAr)

La eficiencia en el uso del agua (EUAr) se expresa como la cantidad de producción comercial producida por cada mm de agua aplicada (conjunto de riego y precipitación). En la tabla 12 se muestran los valores de EUAr ($kg \cdot m^3$) obtenidos para cada tratamiento.

Tabla 12. Eficiencia en el uso del agua (EUA_r) (kg·m³) de los diferentes tratamientos.

EFICIENCIA EN EL USO		
	DEL AGUA (EUA_r)	SE
	kg·m³	
Ds_P	19,4	0,68
Ac_P	23,0	1,99
Ac_Ps	22,0	2,59
Ac_Wat	25,8	0,87
Ac_Ech₂O	25,6	1,23
	n.s.	
n.s: no significativo.		

Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas entre tratamientos, aunque se observó que la eficiencia en el uso del agua es mayor en suelo con acolchado plástico que en suelo desnudo. Dentro del suelo acolchado los tratamientos de riego pilotados por sensores presentan valores mayores que el tratamiento testigo FAO 56.

3.7. EVOLUCIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

En la figura 15 se representan las lecturas de los sensores de humedad de suelo en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo a 0,15 y 0,5 m de profundidad, así como el agua semanal acumulada aplicada mediante riego, los eventos de lluvia y la ETC en los tratamientos con suelo acolchado.

En la etapa de trasplante (día 131 – día 144) se observó uniformidad en el nivel de agua en el suelo en todos los tratamientos a la profundidad de 0,15 m encontrándose el suelo en estado de capacidad de campo e incluso en saturación, estos datos también se observaron en las gravimetrías realizadas los días 17 y 31 de mayo (tabla 13). Esta humedad se consiguió con el aporte del riego de trasplante, igual en todos los tratamientos, para asegurar el arraigo y supervivencia de las plantas. De esta manera, al iniciarse la etapa de cultivo todos los tratamientos tuvieron un nivel de humedad similar. Se produjo algún evento de lluvia con pequeños aportes (2 l/m²), datos que no tienen repercusión en los gráficos. En cambio, tuvo lugar un evento de lluvia de 14,4 l/m² el día 140 que, junto con el aporte de agua con riego, aumentaron el nivel de agua en suelo. Este aumento se observó a más a 0,5 m de profundidad ya que a 0,15 m el suelo ya se encontraba en niveles muy altos de humedad como reflejó la lectura de los sensores a dichas profundidades para todos los tratamientos.

Tabla 13. Humedad gravimétrica y agua útil en distintos momentos del ensayo a las profundidades de instalación de los sensores de humedad.

Prof. (m)	Ds_P		Ac_P		Ac_Ps		Ac_Wat		Ac_Ech ₂ O		
	0-0,2	0,4-0,6	0-0,2	0,4-0,6	0-0,2	0,4-0,6	0-0,2	0,4-0,6	0-0,2	0,4-0,6	
17/05	Hum.vol. (%)	36,0	33,4	37,6	35,8	33,9	33,2	37,4	34,3	35,6	29,3
	% Agua útil	1,15	0,82	1,25	0,98	1,01	0,81	1,24	0,88	1,12	0,55
31/05	Hum.vol. (%)	36,8	34,8	36,0	34,1	31,4	34,3	34,5	35,0	33,1	32,8
	% Agua útil	1,20	0,92	1,15	0,87	0,86	0,88	1,05	0,92	0,96	0,78

En la siguiente etapa, correspondiente al máximo desarrollo vegetativo (día 145 – día 187), en los tratamientos con sensores (Ac_Wat y Ac_Ech₂O) se aplicó un 29% más de agua mediante riego, manteniendo los niveles de humedad del suelo en los valores mínimos preestablecidos; mientras que en los tratamientos Ac_P y Ac_Ps el nivel de agua en suelo es más bajo, tanto a 0,15 como a 0,5 m de profundidad. La disminución de la humedad en los tratamientos basados en FAO 56 indicó que el cultivo empleó parte de las reservas de agua en el suelo para cubrir sus necesidades lo que pudo estar indicando que este método infraestimó su consumo de agua durante este periodo. Así, para mantener los niveles de agua en el suelo constantes los tratamientos Ac_Wat y Ac_Ech₂O necesitaron 190,1 y 181,1 l/m² de riego respectivamente frente a los 149,2 l/m² aplicados por el tratamiento Ac_P y los 138,3 l/m² del tratamiento Ac_Ps. Se pudieron ver algunos eventos de lluvia en la primera mitad de la etapa con aportes de agua muy bajos (2 l/m²), produciéndose el día 171 el mayor aporte con 6,5 l/m².

A partir del máximo desarrollo del cultivo hasta alcanzar el 10% de frutos maduros (día 188 – día 213), se observó como los niveles de agua en los tratamientos Ac_P y Ac_Ps estuvieron por debajo de los umbrales de riego a 0,15 m (-25 cb y 0,223% VWC). Los niveles de agua en el suelo se mantuvieron en el nivel de la etapa previa, lo que indicó que la estimación del método FAO 56 compensó las necesidades de agua de las plantas y el riego aportado fue suficiente para que el cultivo no tuviera que emplear las reservas del suelo para encontrar un aporte adicional. En esta etapa se aplicó un 23% más de agua en los tratamientos Ac_P y Ac_Ps que en los tratamientos pilotados por sensores. Como se observa en los gráficos, el nivel de agua de los tratamientos pilotados por sensores fue adecuado, estando próximo al umbral. Por tanto, la cantidad de agua que necesitó el cultivo no fue tanta como la que se aplicó por el método FAO 56.

En la última etapa, desde el 10% de frutos maduros hasta la cosecha (día 214 – día 241), el agua aplicada en los tratamientos fue similar.

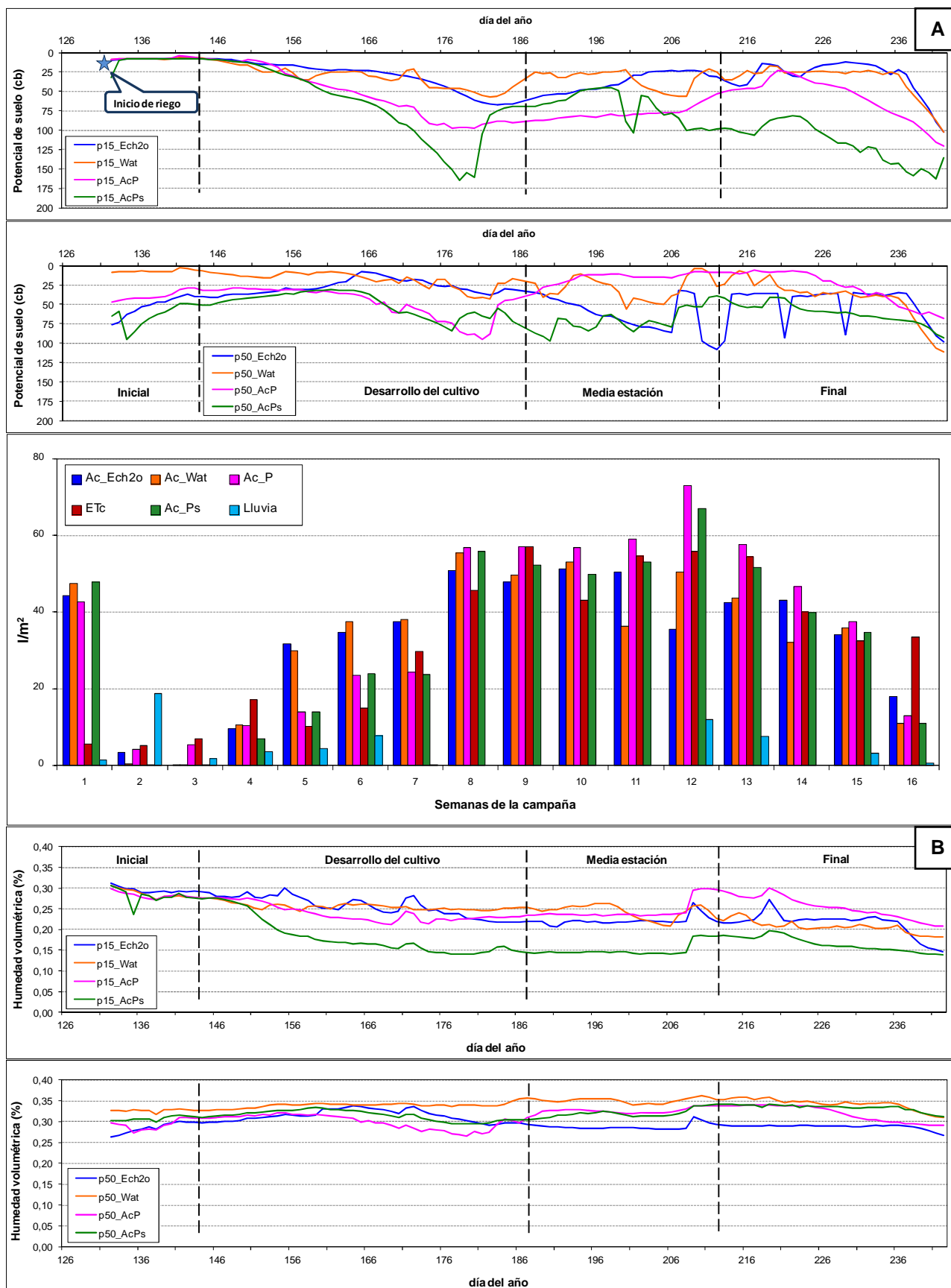


Figura 15. Evolución de la humedad del suelo a 0,15 y 0,5 m de profundidad en cada tratamiento medida con sensores de matriz granular (A) y con sensores de tipo capacitivo (B). Riego, ETc y eventos de lluvia de la campaña acumulado por semanas.

En los tratamientos en los que el riego se desencadenaba de forma automática por sensores y en el tratamiento Ac_Ps, el riego tras el trasplante se inició la cuarta semana, mientras que en el tratamiento Ac_P se había iniciado la tercera semana (figura 15), por tanto el uso de sensores permitió retrasar en 8 días el inicio del riego tras el trasplante.

En general, en la fase de desarrollo el riego aplicado en los tratamientos Ac_Wat y Ac_Ech₂O fue superior a la evapotranspiración del cultivo. Las semanas 12 y 13, en las que se produjeron lluvias, el riego de los tratamientos pilotados por sensores fue menor que la ET_c, por tanto los sensores detectaron el aumento de humedad del suelo producido por la lluvia y disminuyeron el volumen de agua de riego (figura 15).

Durante la campaña 2012 se cubrieron las necesidades del cultivo fundamentalmente mediante riego ya que apenas se produjeron eventos de lluvia. Por tanto, no ha sido posible evaluar de forma precisa el uso de los sensores, para cortar el riego si el nivel de agua en suelo después de eventos de lluvia era superior al umbral establecido e iniciarlo cuando las lecturas determinaran niveles por debajo de dicho umbral, con el objetivo de valorar el ahorro de agua producido. A continuación se detallan dos eventos de lluvia registrados durante el cultivo. En estos días de lluvia y posteriores, la cantidad de agua aplicada por riego en los tratamientos basados en la metodología FAO fue similar, mientras que los tratamientos pilotados por sensores aportaron menos cantidad de agua al haber detectado los aportes de agua por lluvia (tabla 14).

Tabla 14. Agua aplicada por riego los días con eventos de lluvia (208-209 y 218) y posteriores.

	l/m²			
	Ac_P	Ac_Ps	Ac_Wat	Ac_Ech₂O
26/07/2012 (208)	8,9	9,0	10,0	8,1
27/07/2012 (209)	9,5	10,2	10,5	4,6
28/07/2012 (210)	9,6	10,1	10,6	0,0
29/07/2012 (211)	10,8	10,2	4,0	0,0
30/07/2012 (212)	9,5	10,2	0,0	4,9
05/08/2012 (218)	7,8	7,8	8,1	6,9
06/08/2012 (219)	7,9	7,8	4,0	1,4
07/08/2012 (220)	6,0	5,7	0,0	0,0
08/08/2012 (221)	6,3	5,6	1,4	0,0
09/08/2012 (222)	5,6	5,5	10,3	9,4

Después de las lluvias de los días 208 y 209, con aportes de 5,29 y 6,49 l/m² respectivamente, se produjo un aumento en el nivel de agua del suelo reflejado en las lecturas de los sensores Watermark y Ech₂O, principalmente a 0,15 m de profundidad, y disminuyó el número de riegos y agua aplicada por riego de los tratamientos pilotados por sensores (Ac_Wat y Ac_Ech₂O). A esta profundidad, los sensores Watermark reflejaron variaciones en las lecturas desde -51 cb a -38 cb en el tratamiento Ac_Wat, desde -81 cb a -18 cb

en el Ac_Ech_{2o}, desde -125 cb a -80 cb en el Ac_Ps. En el tratamiento Ac_P no se observó variación (figura 16). Los sensores Ech_{2o} reflejaron variaciones en las lecturas desde 0,24% a 0,26% en el tratamiento Ac_Wat, desde 0,21% a 0,28% en el Ac_Ech_{2o}, desde 0,14% a 0,20% en el Ac_Ps y desde 0,24% a 0,30% en el Ac_P (figura 17).

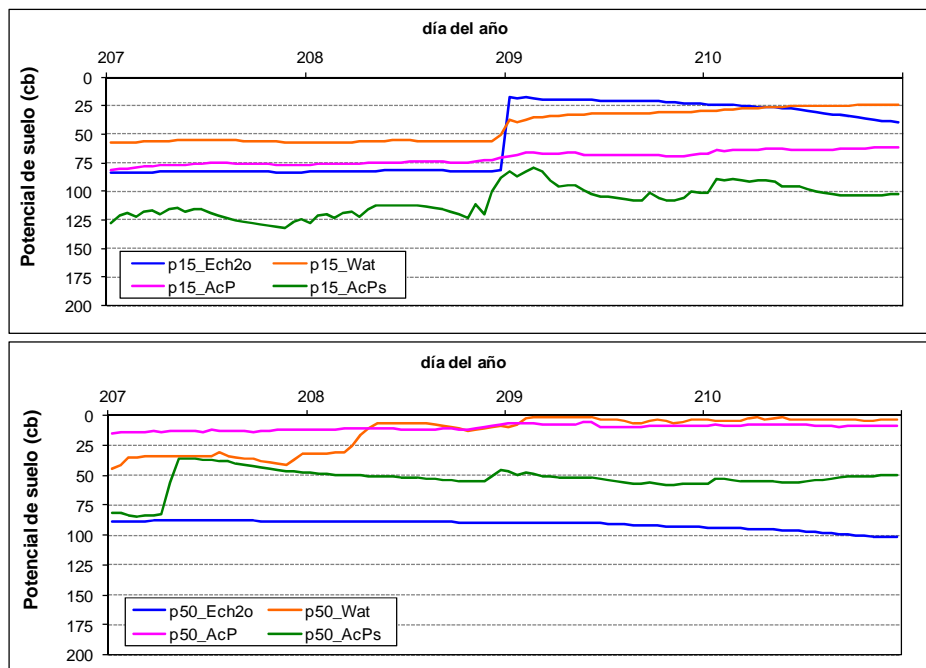


Figura 16. Lectura horaria de sensores Watermark a 0,15 y 0,5 m de profundidad al producirse eventos de lluvia los días 208 y 209 con 5,29 y 6,49 l/m² respectivamente.

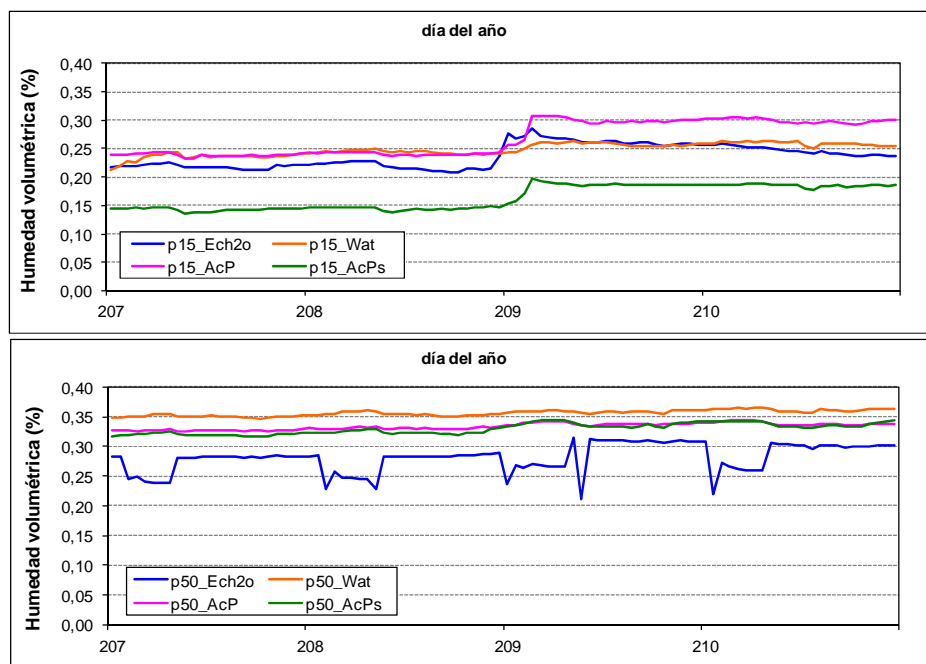


Figura 17. Lectura horaria de sensores Ech_{2o} a 0,15 y 0,5 m de profundidad al producirse eventos de lluvia los días 208 y 209 con 5,29 y 6,49 l/m² respectivamente.

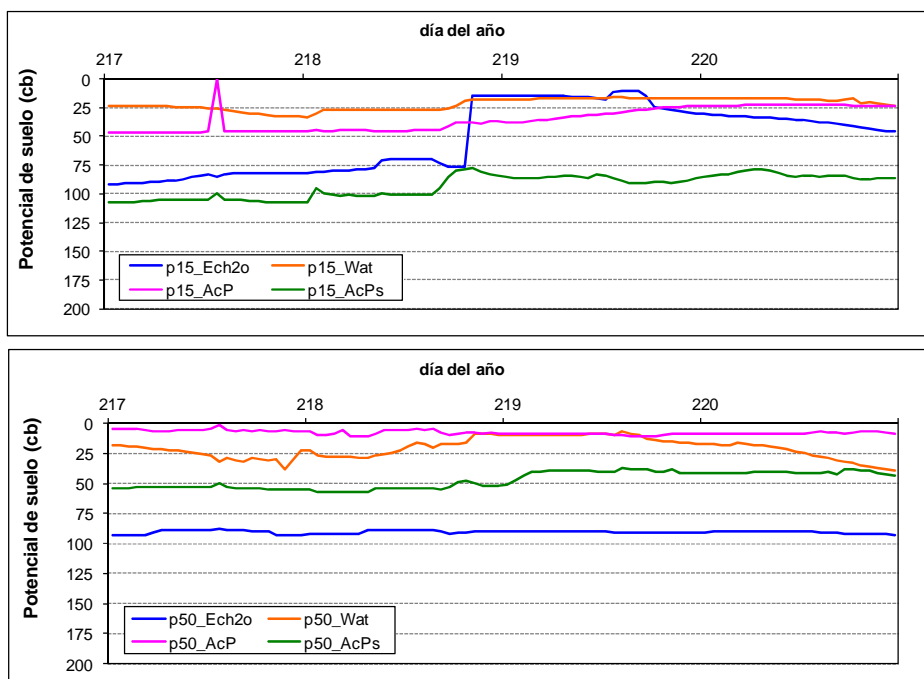


Figura 18. Lectura horaria de sensores Watermark a 0,15 y 0,5 m de profundidad al producirse eventos de lluvia el día 218 con $7,51 \text{ l/m}^2$.

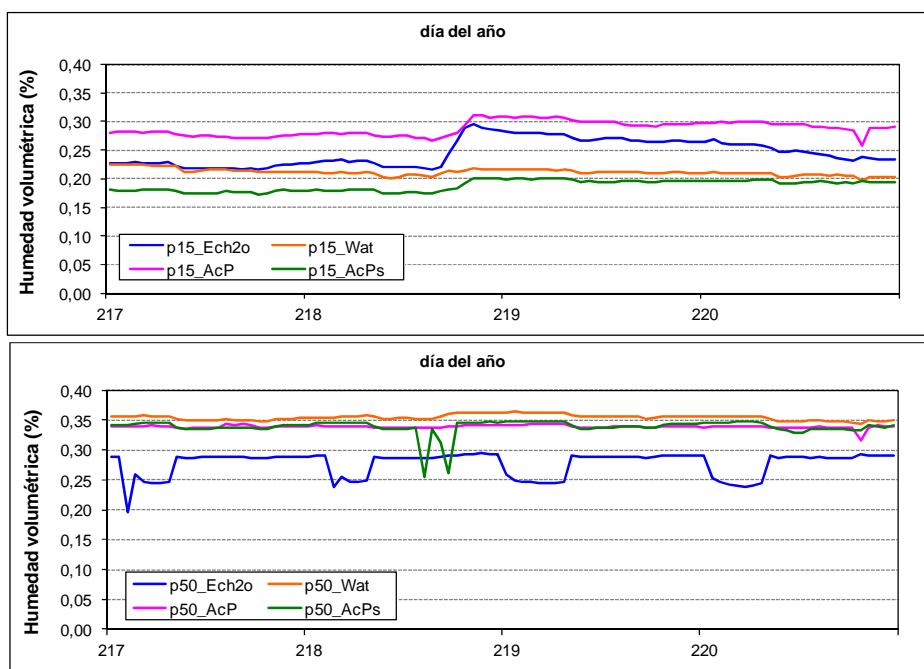


Figura 19. Lectura horaria de sensores Ech_{2o} a 0,15 y 0,5 m de profundidad al producirse eventos de lluvia el día 218 con $7,51 \text{ l/m}^2$.

El día 218 se produjo otro evento de lluvia que aportó $7,51 \text{ l/m}^2$. Al igual que en el caso anterior, se observó un aumento del nivel de agua en suelo a 0,15 m y, en menor medida, a 0,5 m de profundidad, así como una disminución del número de riegos y agua aplicada. Los sensores Watermark reflejan variaciones en las lecturas a 0,15 m de profundidad desde -35 cb a -20 cb en el tratamiento Ac_Wat, desde -75 cb a -20 cb en

el Ac_Ech₂₀, desde -110 cb a -75 cb en el Ac_Ps y en el Ac_P desde -48 cb a -25 cb (figura 18). Los sensores Ech₂₀ reflejan variaciones en las lecturas desde 0,22% a 0,29% en el tratamiento Ac_Ech₂₀, desde 0,26% a 0,31% en el Ac_P. En los tratamientos Ac_Wat y Ac_Ps apenas se aprecia variación (figura 19).

Por tanto, aunque fueron pocas las lluvias durante la campaña de cultivo, los sensores fueron capaces de modular el riego y reducir el agua aplicada durante estos momentos con respecto a los tratamientos basados en la ETc.

3.7.1. Balance de agua

La simulación del balance diario mostró unos resultados similares a los observados con los sensores de humedad de suelo (figura 20). Durante la fase de trasplante (hasta día 144) todos los tratamientos con suelo acolchado estuvieron próximos a capacidad de campo y se produjo un drenaje medio, por debajo de la profundidad radicular (20 cm), de 44 mm. En la fase de desarrollo (hasta el día 187) todos los tratamientos estuvieron en niveles altos de humedad hasta la parte final de la fase (a partir del día 171) donde los tratamientos regados por la metodología FAO presentaron valores menores de los niveles de humedad, aunque siempre por encima del límite de agotamiento para el cultivo, por lo que ninguno de los tratamientos sufrió déficit hídrico. Esta situación se mantuvo en la siguiente fase del cultivo hasta el día 195, momento en el que los tratamientos regados por la metodología FAO presentaron niveles de humedad próximos a capacidad de campo.

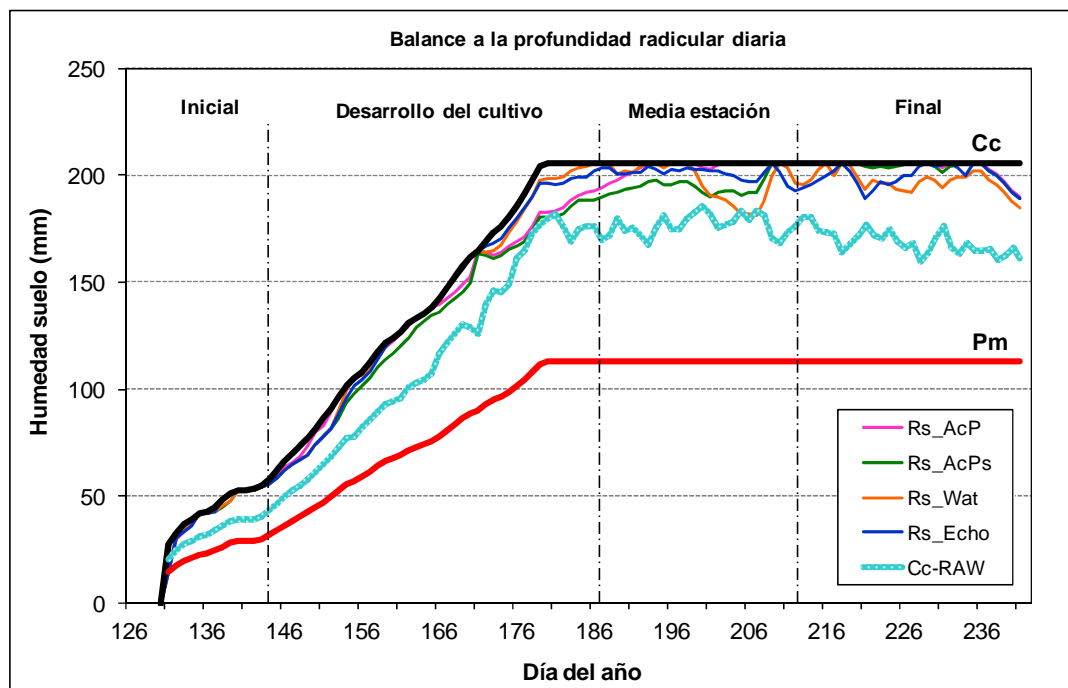


Figura 20. Balance de agua a la profundidad radicular diaria del cultivo de tomate en los diferentes tratamientos de suelo acolchado. (Rs: humedad del suelo en la profundidad radicular).

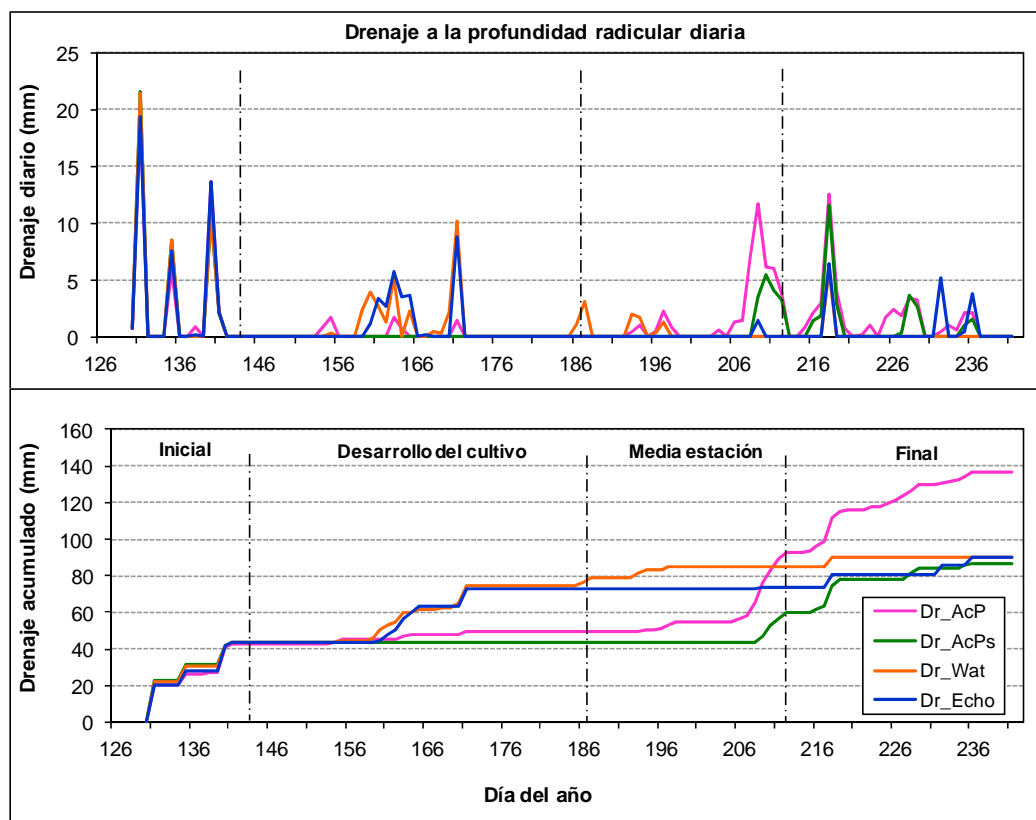


Figura 21. Drenaje diario y acumulado, por debajo de la profundidad radicular diaria, en los diferentes tratamientos de riego en suelo acolchado.

El drenaje fue similar en todos los tratamientos hasta el día 160, mitad de la fase de desarrollo. Al final de esta fase (día 186) el drenaje en los tratamientos regados con sensores, cuya humedad presentó valores próximos a capacidad de campo durante el cultivo, fue de 76,2 mm y 72,6 mm en los tratamientos Ac_Wat y Ac_Echo respectivamente, mientras que en los tratamientos regados por la metodología FAO fue un 37,5% menor, 49,2 mm Ac_P y 43,8 mm Ac_Ps (figura 21). A partir de este momento el drenaje en los tratamientos pilotados por sensores fue muy pequeño hasta la cosecha, mientras que en los tratamientos Ac_P y Ac_Ps el drenaje aumentó a partir del día 206, alcanzándose al final de la cosecha un valor de drenaje final similar en todos los tratamientos, excepto en el tratamiento Ac_P (tratamiento que recibió más agua de riego).

Hasta el inicio de la fase de media estación el drenaje se produce por debajo de la profundidad radicular del cultivo, pero no supera los 60 cm de profundidad (máxima profundidad considerada para el balance), por lo que aunque es agua que no es aprovechable en ese momento por el cultivo no se pierde del sistema y a partir de que el cultivo alcance su máximo desarrollo, las raíces podrán explorar estas capas de suelo y aprovechar el agua drenada de capas superiores (figura 22).

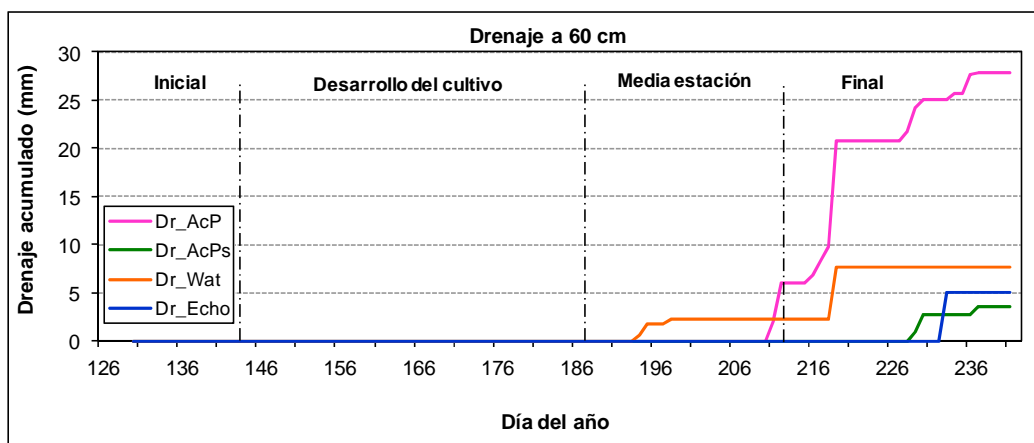


Figura 22. Drenaje acumulado, a 60 cm, en los diferentes tratamientos de riego en suelo acolchado.

3.8. COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DESCRITAS

Una vez analizados los resultados obtenidos en el ensayo, es importante valorar o evaluar el uso y/o funcionamiento de los sensores de humedad, Ech₂o y Watermark.

Respecto los sensores Ech₂o cabe decir que las labores de preparación del terreno inmediatamente previas al transplante hacen inviable instalar los sensores con antelación suficiente como para conocer los intervalos de contenido volumétrico en los que van a trabajar durante la campaña. Además hay pocos días entre la instalación de los sensores y el momento en el que es necesario iniciar los riegos, resultando difícil referenciar las lecturas de Ech₂o a intervalos de agua útil para facilitar su uso en el diseño de una estrategia de riego. A este problema de tiempo se le une que las lecturas de los sensores se ven muy afectadas por las condiciones locales en las que miden. En el caso de cultivos plurianuales se puede recomendar el uso de estos sensores, ya que con los datos de una campaña es posible calibrar el sistema para las siguientes. Otro aspecto a tener en cuenta es que estos sensores muestran mayor sensibilidad tanto en la zona de suelo cercana o en saturación como en zonas más secas.

En cuanto a los Watermark, el uso habitual en campo por los agricultores puede ser viable si establecen un número reducido de sensores y realizan las lecturas con polímetro. Así pueden tomar lecturas en los momentos importantes del cultivo como el período post-transplante y ver si la media de los sensores está por encima del umbral establecido no. Con ese dato y la información obtenida de experiencias previas puede ayudarles a decidir cuándo dar el primer riego ya que el uso de un datalogger que abra y cierre las válvulas de riego requiere de personal con formación adecuada.

4. CONCLUSIONES

Los resultados indican que tanto el modelo de programación de riego basado en el método de los coeficientes como la programación automática con sensores de humedad de suelo permiten obtener buenas producciones, de calidad adecuada, con una alta eficiencia en el uso del agua.

Sin embargo, el manejo mediante sensores requiere un control continuo de los mismos por personal cualificado para evaluar y detectar posibles errores en las lecturas; por posibles problemas en la distribución del agua, por las conexiones del sensor o incluso por la propia dinámica del cálculo de la variable de salida del sensor (potencial del suelo o transformación del % de humedad volumétrica a % de agua útil), que afectaría al riego aplicado al cultivo. Por otro lado, la programación basada en FAO 56 presenta la ventaja de no precisar de instalaciones siempre que se disponga de la información necesaria.

En cultivos anuales, por el tiempo requerido para la calibración y ajuste de las lecturas a porcentaje de agua útil que presentan los sensores ECH₂O, es preferible el uso de sensores Watermark. Estos sensores no necesitan calibración y las unidades de medida con las que proporcionan el nivel de humedad en suelo son fáciles de interpretar.

Aunque los eventos de lluvia durante el cultivo fueron escasos, tanto en número como en volumen de agua, los sensores de humedad de suelo fueron capaces de modular el riego y reducir el agua aplicada durante estos momentos con respecto a los tratamientos basados en la ET_c. En la fase de trasplante, su uso ha permitido retrasar el inicio de riego de cultivo 8 días sin que el desarrollo y la producción del mismo se viesen afectados. Por tanto, si se hubiesen producido eventos de lluvia en más ocasiones, cabría esperar que se hubiese mejorado la eficiencia del uso del agua con respecto al riego empleando sólo el modelo basado en los coeficientes de cultivo.

El modelo de programación de riego basado en FAO 56 puede mejorar su eficacia mediante la combinación con el uso de sensores de humedad del suelo. Se puede conseguir una reducción en el agua aplicada estableciendo el inicio de la temporada de riego después de la irrigación post-trasplante, de acuerdo con las lecturas de las sondas de humedad del suelo.

Los umbrales de riego establecidos para cada tipo de sensor se han mantenido constantes durante la campaña y, en general, se han mostrado adecuados para manejar el riego en este cultivo. Sin embargo, la tolerancia del cultivo a la cantidad de agua disponible en el suelo varía durante su desarrollo, es por ello que el sistema de riego basado en sensores empleado en este ensayo podría ser mejorado ajustando los umbrales de riego a las necesidades del cultivo en cada una de sus fases. Por ello es necesario continuar con más investigaciones para ajustar los niveles de arranque y los umbrales de riego para cada sensor en diferentes suelos, ajustar el momento del corte de riego al final del cultivo y para acoplar la información que proporcionan a modelos de programación de uso general.

5. BIBLIOGRAFIA

Abdul-Baki, A., Spence, C., Hoover, R. 1992. Black polyethylene mulch doubled yield of fresh market field tomatoes. *HortScience* 27: 787-789.

Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Publicación número 56. Roma. FAO.

AOAC. 1970. Official methods of análisis. 11th ed. Association of Official Analytical Chemist, Washington D.C.

Bhella, H.S. 1988a. Effect of trickle irrigation and mulch on growth, yield, and mineral composition of watermelon. *Hortscience* 23: 123-125.

Bhella, H.S. 1988b. Tomato response to trickle irrigation and black polyethylene mulch. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113: 543-546

Burt, C.M., Mutziger, A.J., Allen, R.G., Howell, T.A. 2005. Evaporation research: review and interpretation. *J. Irrig. Drain. Engineering* 131(1): 37-58.

Decagon Devices, Inc. 2008. 10HS Operator's Manual, version 1.0. 19p

Díez Niclos, M.J. 1995. Tipos varietales. En: F. Nuez (coord.), "El cultivo del tomate", pp. 94-129. Mundi – Prensa, Madrid.

Doorembos, J. y Pruitt, W.O. 1977. Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24 (rev.), FAO, Rome, 194 pp.

Dukes, M.D., Simonne, E.H., Davis, W.E., Studstill, D.W. y Hochmuth, R. 2003. Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. In: Proc. 2nd Int. Conf. Irrigation Drainage, 12-15 May, Phoenix. pp. 665-674.

Gabriel, E.L., Lotti, H., Benito, R.M. 1994. Effect of color of polyethylene mulch covering on the production of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.). *Acta Hort.* 357: 243-250.

GIMP 2.6.0. Gimp-ES. <http://www.gimp.org.es>

Ham, J.M., Kluitenberg, G.J. 1994. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch–soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture. *Agricultural and Forest Meteorology* 71: 403-424.

- Hartz, T.K. 2001. Status of drip irrigation for processing tomato production in California. *Act. Hort.* 542: 101-102.
- Huete, J., Pardo, A. y Vázquez, N. 2010. Comparison of Ech₂o-10Hs and Watermark-200SS soil moisture sensors. 3er International Symposium on Soil Water Measurement using Capacitance, Impedance and Time Domain Transmission. Murcia 7-9 de Abril de 2010.
- Ibáñez, M.E. 2011. Determinación de las necesidades hídricas de un cultivo de tomate para industria en riego por goteo y acolchado plástico. Tesis doctoral. Universidad de La Rioja. La Rioja.
- Jones, T., Jones, U., Ezell, D. 1977. Effect of nitrogen and plastic mulch on properties of troupe loamy sand and on yield of "Walter" Tomatoes. *Journal of American Society of Horticultural Science* 102(3): 273–275.
- Kramer, A. 1973. Fruits and vegetables. En A. Kramer y B.A. Twigg (eds.), "Third Ed. Quality control for the food industry. Volume 2. – Applications", pp. 157 – 228. The AVI Publishing company. Westport, Connecticut.
- Kramer, A., Twigg, B.A. 1970. Viscosity and Consistency. En A. Kramer y B.A. Twigg (eds.), "Third Ed. Quality control for the food industry. Volume 1 – Fundamentals", pp. 43 - 62. The AVI Publishing company. Westport, Connecticut.
- Lahoz, I., Garnica, J., Maua, J.I., Ochoa, V. 2007. Efecto del acolchado plástico y de la dosis de riego en un cultivo de tomate de industria. XXV Congreso Nacional de Riegos, pp. 59-60. Pamplona, 15-17 Mayo. Depto. Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra.
- Lecina Brau, S., Martínez-Cob, A. 2000. Evaluación lisimétrica de la evapotranspiración de referencia semihoraria calculada con el método FAO – Penman – Monteith. XVIII Congreso Nacional de Riegos, pp. 37-38. Huelva, 20-22 Junio. Direcc. General de Invest. y Form. Agraria. Junta de Andalucía, Sevilla.
- Macua, J.I., Santos, A., Zúñiga, J. 1999. The effect of the planting date on the programming yield and quality of processing tomato in Navarre (Spain). *Acta Hort.* 487: 229–232.
- Macua, J.I., Garnica, J., Santos, A. 2001. Determinación del momento del corte de riego en el cultivo de tomate para industria. *Actas de Horticultura* 31: 1875-1880.
- Macua, J.I., Lahoz, I., Garnica, J., Calvillo, S., Zúñiga, J., Santos, A. 2004. Tomate de industria: campaña 2003. *Navarra Agraria* 142: 7-15.
- Macua, J.I., Lahoz, I., Calvillo, S., Garnica, J., Santos, A., Díaz, E. 2005. Utilización de acolchados plásticos biodegradables. *Navarra Agraria* 150: 5–13.

- Macua, J.I., Lahoz, I., Bozal, J.M., Zabaleta, J., Calvillo, S. 2009a. Utilización de cubiertas en el tomate de industria en Navarra. Navarra Agraria 172: 29-38.
- Macua, J.I., Lahoz, I., Garnica, J., Zabaleta, J., 2009b. Efecto del acolchado plástico y de la dosis de riego en cultivo. Navarra Agraria 175: 12-16
- Macua, J.I., Lahoz, I., Calvillo, S., Bozal, JM. 2012. Balance de la campaña 2012 y resultados de la experimentación de INTIA en el Valle del Ebro. Navarra Agraria 196: 24 – 28.
- Maiero, M., Schales, F.D., Ng, T.J. 1987. Genotype and plastic mulch effects on earliness, fruit characteristics and yield in muskmelon. Hort. Sci. 22(5): 945-946.
- MARM, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. Avances de superficies y producciones agrícolas: Agosto 2010.
(http://www.mapa.es/estadistica/pags/superficie/Avances_Cultivos_2010-08.pdf).
- Martínez J. M., Etxaleku N., Pavón F., Gómez N. 2006. Cartografía de suelos. Finca Valdegón, Agoncillo (Escala 1:5000): 109-116.
- Muñoz-Carpena, R., Bryan, H. y Klassen, W. 2003. Automatic soil moisture-based drip irrigation for improving tomato production. Proc. Fla. State Hort. Soc. 116: 80-85.
- Pardo, A., Suso, M.L., Vázquez, N., Macua, J.I., Lahoz, I., Garnica, J., Calvo, R. 2001. Efecto del acolchado plástico y del sistema de riego en un cultivo de tomate de industria. Actas del XXII Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas. Cáceres.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Science Society of American Journal 70: 1569-1578.
- Shock, CC.; Feibert, E.B.G.; Saunders, L.D. y Eldredge, E.P. 2002. Automation of subsurface drip irrigation for crop research. In: F.S. Zazueta and J. Xin (eds). Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources. Pp: 809-816.
- Siwek, P., Cebula, S., Libik, A., Mydlarz, J. 1994. The effect of mulching on changes in microclimate and the growth and yield of sweet pepper grown in plastic tunnels. Act. Hort. 366: 161-167.
- Sweeney, D., Graetz, D., Bottcher, A., Locascio, S., Campbell, K. 1987. Tomato yield and nitrogen recovery as influenced by irrigation method, nitrogen source and mulch. Hortscience 22: 27-29.
- Systat[®] 12. <http://www.systat.com>.

Taber, H. 1983. Effects of soil and plant covers on Iowa tomato and muskmelon production. Proceedings of National Agricultural Plastics Conference 17: 37-45

Vázquez, N., Quemada, M., Pardo, A., Suso, M.L. 2001. Evaluación del lavado de nitratos en un cultivo de tomate en riego por goteo y acolchado plástico. En: J.J. López y M. Quemada (eds.), "Temas de investigación en Zona no Saturada", Pamplona, pp: 25-28.

Vázquez, N., Quemada, M., Pardo, A., Suso, M.L. 2002. Evaluación del lavado de nitratos en función de la dosis y la frecuencia de riego en un cultivo de tomate para industria. XXXIV Jornadas de AIDA: Producción sostenible en el medio agrario. ITEA Vegetal 23: 107 – 118.

Vázquez, N. 2004. Evaluación del drenaje y del lavado de nitratos en un cultivo de tomate para industria en riego por goteo y acolchado plástico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. ETSIA. Madrid.

Wien, H.C., Minotti, P.L. 1988. Increasing yield of tomato with plastic mulch and apex renewal. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 113: 342 – 347.

Wien, H.C., Minotti, P.L., Grubinger, V.P. 1993. Polyethylene mulch stimulates early root growth and nutrient uptake of transplanted tomatoes. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 118: 207 – 211.

Wright, J.L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. J. Irrig. Drain. Div. ASCE (ed). 108: 57–74.

Zotarelli, L.; Dukes, M.D., Scholberg, J.M., Hanselman, T., Le Femminella, K. y Muñoz-Carperna, R. 2008. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil. Scientia Horticulturae 116: 8-16.

Bibliografía consultada:

Enciso, J., Porter, D., Peries, X. 2007. Irrigation Monitoring with Soil Water Sensors
http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87470/pdf_2437.pdf?sequence=1

FAO 2009. FAO Media Centre: La agricultura hacia 2050: los retos a superar. (<http://www.fao.org/news/story/es/item/36195/icode/>).

FAO 2009. Water at FAO. (<http://www.fao.org/nr/water/docs/wateratfao.pdf>)

Greenwood, D.J., Zhang, K., Hilton, H.W., Thompson, A.J. 2010. Opportunities for improving irrigation efficiency with quantitative models, soil water sensors and wireless technology. Journal of Agricultural Science 148:1 – 16.

- INE, Instituto Nacional de Estadística. 2012. Encuesta sobre el uso del agua 2010, INE, Madrid. <http://www.ine.es/prensa/np721.pdf>
- Irrrometer. 2005. Watermark Soil Moisture Measurement: Installation and Operation Manual.
- Macua, J.I., Lahoz, I., Garnica, J., Calvillo, S., Zúñiga, J., Santos, A. 2006. Tomate de Industria. Variedades de pelado, otros usos y alto contenido en licopeno. Navarra Agraria 154: 21–31.
- Macua, J.I., Lahoz, I., Garnica, J., Calvillo, S., Zúñiga, J., Santos, A. 2007. Tomate de Industria. Experimentación y campaña 2006 en Navarra. Navarra Agraria 160: 9-22.
- Macua, J.I., Lahoz, I., Santos, A., Zabaleta, J., Calvillo, S., 2009. Tomate de industria. Navarra Agraria 178: 17-25.
- Macua, J.I., Lahoz, I., Santos, A., Calvillo, S., 2010. Tomate de industria. Navarra Agraria 184: 7-14.
- MARM, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. Anuario de Estadística Agroalimentaria 2009, MAPA, Madrid.
- MARM, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2012. Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Informe regadío. MAPA, Madrid.
- Nuez, F. 1995. El cultivo del tomate. Mundi – Prensa, Madrid. 797 pp.
- Ordiales, E., Zajara, L. y Carrasco, L. E. 2011. Técnicas de cultivo en el tomate de industria ecológico. Vida Rural 322: 18 – 24.
- Pedro Urbano Terrón, 1992. Tratado de fitotecnia general. 2ª edición. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 895 pp.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C., 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 929 pp.
- Servicio de información agroclimática de la Rioja (SIAR). www.larioja.org/siar
- Vázquez, N, Huete, J, Pardo, A, Suso ML, Tobar, V. 2010. Use of Soil Moisture Sensors for Automatic High Frequency Drip Irrigation in Processing Tomato.
- Yves Tirilly, Claude Marcel Bourgeois, 2002. Tecnología de las hortalizas. Traducción de Pedro M Aparicio-Tejo, Carmen Lamsfus Amen, 2002. 1ª edición. Zaragoza. Editorial Acribia, SA.