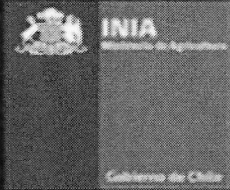




INFORME TÉCNICO Y DIFUSIÓN FINAL
Modelación de Sistema de Agricultura de Precisión
EST-2009-0666

Anexo 4:
Cartillas divulgativas del proyecto

15 de Julio de 2011



INFORMATIVO INIA - URURI

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, CENTRO DE INVESTIGACIONES ESPECIALIZADO EN AGRICULTURA DEL DESIERTO Y ALTIPLANO (CIE),
INIA URURI, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. MINISTERIO DE AGRICULTURA.
INFORMATIVO N° 41, Marzo 2011.

USO DE SENSORES DE CAPACITANCIA PARA EL MONITOREO DEL AGUA EN EL SUELO

Alejandro Antúnez B.

Ing. Agrónomo Ph.D., INIA La Platina

Eduardo Carvallo G.

Ing. Agrónomo, INIA Ururi

Jaime Otárola A.

Ing. Agrónomo, INIA Ururi

El uso eficiente del agua de riego tiene gran relevancia en climas áridos, más aún al constatar los efectos derivados del cambio climático que afecta al planeta agudizando los ciclos de sequía, generando problemas al desarrollo y productividad de la agricultura de la región.

A pesar del masivo uso de sistemas de riego presurizado en la producción agrícola en los valles de la Región de Arica y Parinacota, la tecnología utilizada no se acompaña de una adecuada programación del riego. El monitoreo de la humedad del suelo permite, en gran medida, tomar decisiones relacionadas con la cantidad y oportunidad de aplicación del agua para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos, reduciendo de este modo las pérdidas de agua por percolación o escurrimiento.

El proyecto "Modelación de sistema de agricultura de precisión" que ejecuta INIA con financiamiento FIC-FIA, plantea el desarrollo de una estrategia de programación de riego para los principales cultivos de los valles costeros de la Región. A continuación, se caracterizan dos tipos de sensores evaluados en el marco del proyecto para el monitoreo el agua en el suelo y apoyo a la programación del riego.

Monitoreo del agua en el suelo

Para determinar el contenido de agua en el suelo, se conocen dos clases de métodos: directos e indirectos. En el método directo o método gravimétrico, se colecta una muestra de suelo, se determina su masa en húmedo, se seca en el horno y se pesa nuevamente determinando el peso del suelo seco. La diferencia de masa, corresponde al contenido de agua de la muestra, valor que dividido por la masa del suelo seco, determina el contenido gravimétrico del agua en el suelo (w). Para obtener el contenido volumétrico (θ_v) de agua en el suelo se multiplica por la densidad aparente del suelo. El método gravimétrico es frecuentemente el estándar contra el cual se calibran los métodos indirectos.



Estudio "Modelación de Sistema de Agricultura de Precisión"

Financia FIC Región de Arica y Parinacota - Código FIA EST 2009-0666

Entre los métodos indirectos se encuentran los basados en la tensión del agua en el suelo (tensiómetros), en la conductividad o resistencia eléctrica del suelo (bloques de yeso, watermark) y en el retardo de la velocidad de propagación de neutrones (aspersor de neutrones). Además, en la última década, se han masificado los métodos basados en las propiedades de capacitancia o constante dieléctrica del agua, los que se clasifican en dos grandes tipos: FDR (reflectometría en el dominio de la frecuencia) y TDR (reflectometría en el dominio del tiempo). La mayoría de los materiales del suelo, tales como la arena, arcilla y material orgánico poseen una constante dieléctrica de 2 a 4. El agua tiene la constante dieléctrica más alta, que es de 80.

Por lo tanto, contenidos altos de agua en un sensor de capacitancia estarán relacionados con constantes dieléctricas más altas. Como consecuencia, al medir los cambios en una constante dieléctrica, el contenido de agua se mide indirectamente. A continuación se describen dos tipos de sensores basados en la constante dieléctrica del suelo, que se han empleado en el desarrollo del proyecto para medir la humedad del suelo y asesorar la programación de riego en cultivos de importancia económica en la región, como pimiento (*Capsicum annuum* L.) y maíz (*Zea mays* L.). Es importante señalar que estos instrumentos poseen ventajas y desventajas que orientan en la adquisición y uso de un equipo para el monitoreo del agua en el suelo (Tabla 1).

Tabla 1.- Ventajas y desventajas de algunos métodos e instrumentos para monitorear el agua en el suelo.

Ventajas		Desventajas	
Gravimétrico	Preciso y directo.	- Es un método destructivo. - Existe un tiempo de desfase entre la toma de muestra y el tiempo de secado. - Requiere el secado de la muestra en horno de laboratorio y el uso de una balanza de precisión.	
Diviner 2000	- En un mismo sitio de medición o tubo de acceso, se pueden hacer lecturas a diferentes profundidades de suelo. - Son resistentes, estables y requieren poco mantenimiento. - No son radioactivos, no requieren permiso de utilización.	- Alto costo del equipo, aunque éste puede emplearse para medir en numerosos puntos o sitios. - La sonda FDR tiene un costo de 4.150 dólares, y un CD-ROM de 300 dólares (sin IVA, precios a marzo 2011). - La instalación del tubo de acceso de la sonda se dificulta en algunos suelos. - Presencia de materiales extraños, piedras o grietas dificultan la medida. - Requiere calibración para cada suelo y horizonte.	
Sensores ECH₂O	- Permite realizar medidas continuas del contenido de agua en el suelo. - Medidas a diferentes profundidades. - Son resistente, estables y requieren poca mantención.	- Cada sensor es de bajo costo, pero la implementación de un medidor portátil para el almacenamiento de datos es de un valor elevado. - Cada sensor ECH₂O tiene un costo de 115 dólares, mientras que un registrador de datos con conexión de varios sensores posee un valor de 650 dólares (sin IVA, precios a marzo 2011). - Requiere calibración para cada tipo de suelo.	

Sonda de capacitancia, modelo FDR Diviner 2000

La sonda FDR Diviner 2000, es un instrumento portátil, para la medición de la humedad del suelo. Se constituye por dos secciones principales: una sonda portátil y una unidad de visualización y almacenamiento de datos (Figura 1). La sonda FDR registra la humedad de un suelo mediante la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio, usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias.

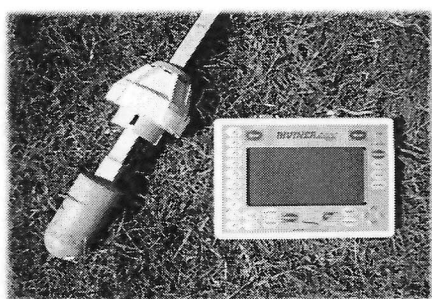


Figura 1.- Sonda Diviner 2000 y consola de almacenamiento y captura de datos.

En la Figura 2, se muestran los principales referentes del agua en el suelo y su relación con la disponibilidad de agua para los cultivos agrícolas. La saturación del suelo representa el llenado del sistema de poros con agua, sin aire que permita el adecuado desarrollo de las raíces. La reducción o ausencia de oxígeno afecta la tasa de crecimiento de la planta de forma directa al afectar el metabolismo de las raíces, con efectos en las plantas que van en detrimento de la producción.

En el rango de humedad aprovechable para los cultivos, es importante conocer la: Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP), ambos valores expresados en porcentajes.

Para determinar estos valores es necesario tomar muestras de suelo y enviarlas a un laboratorio especializado en física de suelos.

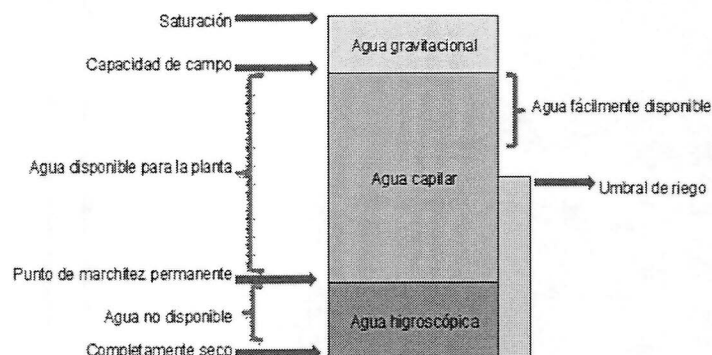


Figura 2.- Parámetros del contenido de agua en el suelo.

La (CC) corresponde al contenido de agua en el suelo después de aplicar un riego de saturación y drenaje libre del suelo, y representa un equilibrio entre las partículas de suelo, aire y agua, en una condición óptima para el desarrollo de las raíces de las plantas. Contrariamente, un suelo con un contenido de agua equivalente a (PMP), no tiene la humedad suficiente para abastecer a las plantas y si se mantiene en esta condición se marchitarán en forma irreversible aún cuando vuelvan a ser regadas. En el extremo inferior, se encuentra el suelo completamente seco, que para fines prácticos no contiene agua gravitacional de utilidad para los cultivos.

Para realizar una buena programación de riego, es necesario conocer los valores de CC y PMP y establecer los límites superior e inferior de humedad aprovechable (HA) o agua disponible para la planta. La humedad aprovechable se define como el volumen de agua retenido entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente o la diferencia entre CC y PMP.

Por su parte, el umbral de riego (%) representa la fracción de agua disponible remanente en el suelo, que define el siguiente evento de riego. De esta forma, se estima que el cultivo puede desarrollarse en forma óptima en un rango de agua en el suelo, acotado entre CC y el definido por el umbral de riego.

Ejemplo de monitoreo de agua en el suelo mediante el uso de sonda de capacitancia FDR.

De acuerdo a los registros de una bandeja de evaporación clase A ubicada cerca del cultivo, el coeficiente de cultivo (K_c) correspondiente al estado fenológico y una precipitación del equipo de 5,5 mm/h, se propuso una

programación de riego calendarizada para el cultivo de pimiento en el valle de Azapa (Tabla 2).

El suelo en que se encuentra establecido el cultivo de pimiento posee una CC de 15,2% y PMP de 7%, ambos expresados en términos volumétricos (cm cm^{-1}), es decir, se encuentran 8,2 mm de agua disponible por cada 10 cm de profundidad de suelo. Considerando un umbral de riego para esta hortaliza equivalente al 50%, multiplicado por el agua disponible determina como límite mínimo de agua en el suelo un contenido volumétrico equivalente a 11,1 % de agua en el suelo ($0,5 * (0,152 - 0,07) + 0,07$).

Tabla 2.- Programación de riego desarrollada para el cultivo del pimiento en el Valle de Azapa.

Mes	ET_a (mm/d)	K_c	Demanda (mm/d)	TR (min/d)
Junio	0,56	0,4	0,22	5,6
Julio	0,88	0,6	0,53	13,2
Agosto	1,01	0,9	0,91	22,8
Septiembre	1,31	1,0	0,13	32,7
Octubre	1,85	1,1	0,20	51,0
Noviembre	2,09	1,2	0,25	62,7
Diciembre	2,13	1,2	0,26	64,0

Se empleó la sonda FDR Diviner 2000 para el monitoreo periódico del agua en el suelo. En la Figura 3, se observa la evolución del contenido del agua en el suelo, entre los meses de julio y diciembre, durante el desarrollo del cultivo de pimiento.

El límite superior destacado con línea punteada, corresponde a la CC, equivalente al 15,2% de $\text{cm}^3 \text{cm}^{-1}$, mientras que el límite inferior indica el umbral de riego del cultivo, que representa el 11,1% mínimo al cual se pueden someter las plantas de pimiento, equivalente a 11,1%.

A partir de una adecuada programación de riego, el contenido volumétrico de agua medido con la sonda Diviner 2000 en el suelo se mantiene dentro de los márgenes de humedad fácilmente aprovechable por el cultivo de pimiento. Los registros de los tubos 42, 43 y 44, corresponden a lecturas obtenidas en cada sitio de medición o tubo de acceso dentro de la misma unidad de riego.

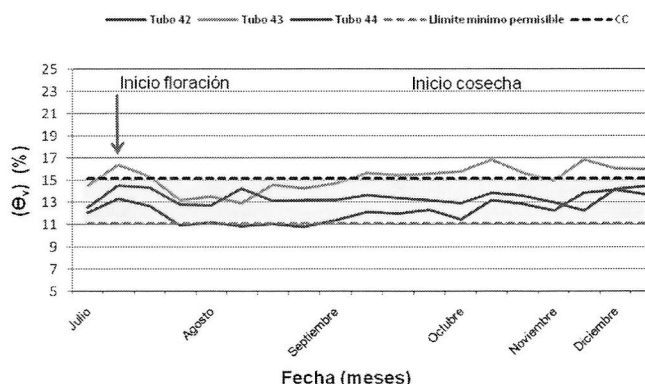


Figura 3.- Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en pimiento, de acuerdo al monitoreo efectuado con sonda Diviner 2000.

Sensores de agua en el suelo ECH²O

Estos sensores miden los cambios en la constante dieléctrica del suelo con un capacitor que consta de tres placas de un material conductor que están separadas por una distancia corta (Figura 4). Al aplicar un voltaje en un extremo de la placa, el material que está entre las dos placas almacena cierto voltaje, mientras que un medidor lee el voltaje conducido entre las placas.

Los sensores se deben instalar a diferentes profundidades en áreas representativas del terreno con el fin de dar seguimiento al movimiento del agua del suelo y determinar su agotamiento dentro de la zona de raíces.

Los sensores se pueden colocar perpendicular o verticalmente a la superficie del suelo. Esto permitirá monitorear la humedad y determinar el uso del agua por el cultivo a través del tiempo. Ya que los sensores miden el contenido de agua cerca de su superficie, es importante evitar las bolsas de aire y la compactación excesiva del suelo alrededor de los sensores para obtener lecturas más representativas del suelo natural.



Figura 4.- Sensor ECH²O e instalación en el perfil de suelo.

Estos sensores proporcionan las lecturas de los contenidos volumétricos de agua en el suelo a la profundidad a la que se colocan. Los sensores pueden conectarse a un sistema de registro de datos y con un cable en serie se descarga la información a un computador personal (Figura 5).

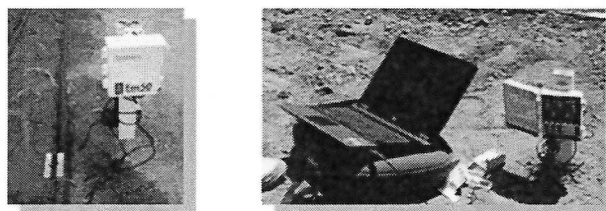


Figura 5.- Sensores conectados a sistema de registro y descarga a un computador personal.

El registrador de datos se puede programar para realizar lecturas del sensor de humedad a diferentes intervalos de tiempo (ejemplo: 1 lectura cada 15 minutos, 2 ó 24 horas). Con este sistema es posible registrar la información del contenido de agua en el suelo durante toda la temporada del cultivo.

Ejemplo de monitoreo de agua en el suelo mediante sensores de capacitancia.

Para el monitoreo del comportamiento del agua en el suelo, se emplearon sondas ECH²O, que proporcionan una medición continua.

En este cultivo, se emplearon registros meteorológicos medidos en una estación cercana al cultivo, el K_c correspondiente al estado fenológico y una precipitación del equipo de 11,76 mm/h.

El suelo en que se encuentra establecido el cultivo de pimiento posee una CC de 33,02% y PMP de 14,43%, ambos expresados en términos volumétricos (cm³/cm³), es decir, que se encuentran 18,6 mm de agua disponible por cada 10 cm de profundidad de suelo. El umbral de riego considerado para este cultivo corresponde al 50 %, el que multiplicado por el agua disponible determina como límite mínimo de agua en el suelo un contenido volumétrico equivalente a 23,73% de agua en el suelo ($0,5 * (0,3302 - 0,1443) + 0,1443$).

En Figura 6 se grafica el monitoreo del contenido de agua en un suelo de textura franco limoso, en tres profundidades (20, 40 y 60 centímetros) mediante el uso de sensores ECH²O. La lectura del agua en el suelo a tres profundidades de suelo y su mantención dentro del margen de agua fácilmente disponible facilita la toma de decisiones con respecto a los de tiempos y frecuencias de riego para el cultivo de maíz.

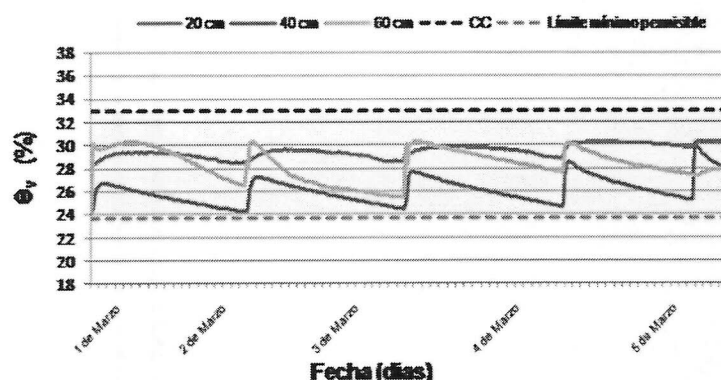
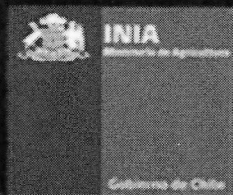


Figura 6.- Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en maíz choclero, de acuerdo al monitoreo efectuado con sensores ECH²O.

Comentarios finales

Para los cultivos del valle de Azapa, como pimiento y maíz choclero, es posible monitorear el contenido de agua en el suelo mediante por los sensores ECH²O (registro continuo) y sonda Diviner 2000 (registro discreto). De esta forma el uso de esta tecnología facilita la toma de decisiones con respecto a la frecuencia y tiempos de riego que permite maximizar su uso en los cultivos del valle, optimizando su producción. Asimismo, una adecuada programación de riego permite conservar el recurso hídrico, reducir los impactos ambientales y reducir costos, aumentando la rentabilidad de los cultivos agrícolas del valle y de la región.



INFORMATIVO INIA - URURI

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, CENTRO DE INVESTIGACIONES ESPECIALIZADO EN AGRICULTURA DEL DESIERTO Y ALTIPLANO (CIE),
INIA URURI, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. MINISTERIO DE AGRICULTURA.
INFORMATIVO Nº 42, ABRIL 2011.

PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN CULTIVOS DE IMPORTANCIA ECONÓMICA DEL VALLE DE AZAPA

Alejandro Antúnez B.
Ing. Agrónomo Ph. D., INIA La Platina

Eduardo Carvallo G.
Ing. Agrónomo, INIA Ururi

Jaime Otárola A.
Ing. Agrónomo, INIA Ururi

El proyecto "Modelación de Sistema Agricultura de Precisión" financiado por el Gobierno Regional de Arica y Parinacota con la supervisión de FIA, propone el desarrollo de información local que apoye la toma de decisiones de riego en los principales cultivos hortícolas del valle de Azapa, para generar criterios o pautas de riego transferibles a la comunidad agrícola del sector.

En el valle de Azapa, los programas de riego asociados al rubro hortícola presentan frecuentemente deficiencias relacionadas con la cantidad y oportunidad de aplicación del agua. Para enfrentar esta brecha tecnológica, se desarrolló una programación de riego específica para cultivos hortícola de importancia económica en la zona, a partir de los registros de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) y bandejas de evaporación clase A, complementado con el monitoreo continuo del contenido de agua en el suelo.

Para determinar la oportunidad y altura de riego a aplicar, en otras palabras cuando y cuanto regar, es necesario considerar algunos aspectos importantes, tales como:

- Las propiedades físico-hídricas del suelo en particular.
- La intensidad de precipitación o tasa de aplicación neta del sistema de riego.
- La eficiencia del sistema de riego.
- La fracción de lavado de sales.
- El monitoreo periódico del contenido volumétrico (θ_v) del agua en el suelo.

Las pautas de riego fueron desarrolladas para dos de los principales cultivos de la zona:

1. Programación de riego basada en mediciones de evaporación diarias desde una bandeja de evaporación clase A. Cultivo: tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo malla antiáfido. Predio Agrícola Truffa, ubicado en el Km 19 del valle de Azapa.
2. Programación de riego basada en registros meteorológicos aportados por la EMA ubicada en las cercanías del sector. Cultivo: maíz choclero



ARICA Y PARINACOTA
GOBIERNO REGIONAL

Estudio: "Modelación de sistema de agricultura de precisión".
Financia FIC Región de Arica y Parinacota - Código FIA EST 2009-0666

(*Zea mays* L.) híbrido Prays-214 de Alliance. Predio Massai, ubicado en el Km 8 ½ del valle de Azapa.

Programación de riego en tomate, a partir de los registros de evaporación de una bandeja Clase A en invernadero con cubierta de malla antiáfidos.

Para un cultivo de tomate bajo malla antiáfido ubicado en el Km 19 del valle de Azapa, se propuso una pauta de riego basada en registros de un evaporímetro de bandeja instalado al interior de la nave. El uso de la bandeja de evaporación es uno de los métodos más simples para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia. El principio del uso del evaporímetro de bandeja, es relativamente sencillo al relacionar la tasa de evaporación (mm d^{-1}) de una superficie de agua libre con la evapotranspiración del cultivo de referencia (gramínea libre de malezas, bien regada y en óptimo estado sanitario).

Dimensiones, instalación y mantención de la bandeja de evaporación clase A.

- La bandeja de evaporación es un recipiente cilíndrico fabricado corrientemente de latón galvanizado de 0,8 mm con un diámetro de 120,7 cm y una altura de 25,4 cm. La estructura se instala sobre apoyos de madera que a su vez descansan sobre el terreno (Figura 1). El fondo del tanque debe instalarse 10 cm por encima del nivel del suelo, aunque el espacio que queda por debajo de los apoyos debe rellenarse con tierra, dejando un espacio libre de sólo 5 cm bajo el fondo del tanque.

- La bandeja debe ser pintada de color blanco con algún tipo de pintura resistente a las condiciones climáticas, teniendo la precaución de mantenerla siempre limpia (libre de algas, tierra,

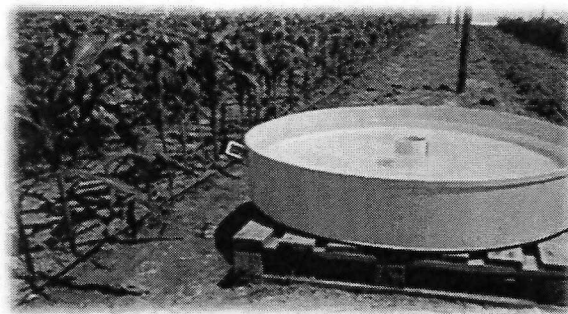


Figura 1.- Bandeja de evaporación Clase A.

otros). Es muy recomendable cambiar el agua de la bandeja cada 2 a 3 semanas, dependiendo de la limpieza del agua. Otra consideración importante al momento de cambiar el agua de la bandeja, es agregar 2 a 2,5 litros de hipoclorito de sodio comercial para evitar la proliferación de algas.

- Debe ser instalada sobre una estructura de madera de 10 cm de alto, teniendo el cuidado de dejarla bien nivelada al momento de la instalación.

- Posteriormente, la bandeja debe ser llenada con agua. La altura del agua no debe sobrepasar los 5 a 7 cm del borde superior de la bandeja.

- Se deben tomar las medidas de seguridad necesarias para la protección de la bandeja, para evitar problemas de utilización del agua por operarios, animales silvestres o domésticos, situación muy corriente en la mayoría de los predios.

Medición de la evaporación

La altura del agua evaporada se mide con una regla y se registra diariamente a una hora determinada (de preferencia entre 8:00 y 10:00 am). Después de la lectura, se rellena con agua hasta el nivel establecido como cero, con la ayuda de un marcador con rasante.

Otra forma de medir la evaporación de bandeja es utilizando volúmenes graduados que representan una determinada altura de agua evaporada. Estos volúmenes suelen venir calibrados de fábrica al adquirir el evaporímetro. Utilizando envases graduados de 0,1 mm y 1 mm, cada día se vuelve a llenar hasta el nivel establecido. Por ejemplo, si se ha vertido dos veces el envase grande (2 mm) y una vez el envase chico (0,1 mm) para recuperar el nivel rasante, representa una evaporación de bandeja equivalente a 2,1 mm.

Para determinar las necesidades de evapotranspiración del cultivo de referencia, basta conocer la evaporación de bandeja que se expresa en mm d^{-1} , y corregir este valor con un coeficiente de bandeja (K_p). El producto de esta operación multiplicado por un coeficiente de cultivo (K_c) permite calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o), que depende del estado de desarrollo vegetativo del cultivo de interés, en este caso del tomate.

La estimación de la evapotranspiración de referencia en función de la evaporación de bandeja se calcula a partir de la siguiente relación:

$$ET_o = EB \times K_p$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia, mm d^{-1}

EB = evaporación de bandeja, mm d^{-1}

K_p = coeficiente de bandeja (0,8 en invernadero)

Por otra parte, para calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c), es necesario conocer el valor del coeficiente (K_c) correspondiente al estado fenológico del cultivo, empleándose la siguiente relación:

$$ET_c = EB \times K_p \times K_c$$

Ejemplo de programación de riego a partir de los registros de un evaporímetro de bandeja Clase A.

A partir de los registros de la bandeja de evaporación en mm d^{-1} , ubicada muy cerca del cultivo (dentro del invernadero), conociendo el coeficiente de bandeja (K_p), el coeficiente de cultivo (K_c) correspondiente al estado fenológico, la precipitación del equipo y la fracción de lavado de sales; se propuso una programación de riego para el cultivo de tomate en el mes de septiembre en el valle de Azapa.

- Altura de agua evaporada en la bandeja Clase A.

Para determinar la lámina evaporada diaria mm d^{-1} de la bandeja, de acuerdo al volumen evaporado registrado, debe considerarse el radio de la bandeja de evaporación equivalente a 60,35 cm (0,6035 m).

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = 3,1416 \times (0,6035)^2$$

$$A = 1,14 \text{ m}^2$$

Por ejemplo, el día 10 de septiembre del 2010, se registró un volumen evaporado en la bandeja equivalente a 2,1 litros. De esta forma, la altura de agua equivalente se calcula a partir de la siguiente relación:

$$2,1 \text{ L} \rightarrow 1,14 \text{ m}^2$$

$$\frac{x \text{ L} \rightarrow 1 \text{ m}^2}{x = 1,84 \text{ L m}^{-2}, \text{ equivalente a } 1,84 \text{ mm d}^{-1}}$$

$$x = 1,84 \text{ L m}^{-2}, \text{ equivalente a } 1,84 \text{ mm d}^{-1}$$

- Evapotranspiración de cultivo

Para determinar la evapotranspiración del cultivo de tomates, es necesario conocer el coeficiente de bandeja y el coeficiente de cultivo para esa etapa fenológica. Al multiplicar éstos términos por la lámina evaporada en la bandeja se obtiene:

$$ET_c = EB \times K_p \times K_c$$

$$ET_c = 1,84 \times 0,8 \times 1,0$$

$$ET_c = 1,47 \text{ mm d}^{-1}$$

De esta manera, para satisfacer los requerimientos de evapotranspiración del cultivo de tomate en invernadero, el sistema de riego debe reponer una altura equivalente a 1,47 mm por día, equivalente a 1,47 L m⁻².

- Intensidad de precipitación del sistema de riego:

A partir del caudal de los emisores y de las distancias entre emisores y sobre la línea de riego, es posible calcular la intensidad de precipitación o tasa de aplicación de agua que entrega el sistema de riego por goteo, a partir de la siguiente relación:

$$IP \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Caudal del gotero (L h}^{-1}\text{)}}{Dge \times Dgs}$$

Donde:

IP: Intensidad de precipitación (mm h⁻¹).

Dge: Distancia de goteros entre la línea de riego (m).

Dgs: Distancia de goteros sobre la línea de riego (m).

El sistema de riego tiene cintas de riego que entregan un caudal de 1 L h⁻¹, con emisores espaciados a 20 cm sobre hilera, mientras que las líneas de riego o laterales se encuentran espaciadas a 2,5 m. De esta forma, la Intensidad de precipitación del sistema de riego es:

$$IP \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = \frac{1 \text{ L h}^{-1}}{2,5 \times 0,2} \times 2 \text{ cintas}$$

$$IP = 4 \text{ mm d}^{-1}.$$

- Fracción de lavado:

La fracción de lavado necesaria para mantener la concentración de sales del suelo en un rango adecuado para el cultivo, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$FL = \frac{CEw}{2 \times CEes, max}$$

Donde:

CEw: Conductividad eléctrica del agua de riego (dS.m⁻¹).

CEes,max: Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo máxima tolerable por el cultivo (dS m⁻¹).

Si la conductividad eléctrica del agua de riego es de 2 dS m⁻¹ y la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo máxima tolerable por el cultivo es de 12,5 dS m⁻¹, la fracción de lavado equivale a:

$$FL = \frac{2}{2 \times 12,5} = 0,08$$

- Tiempo de Riego

El tiempo de riego en minutos por día (min d⁻¹) se determina considerando la evapotranspiración del cultivo (determinada en este ejemplo a partir de las lecturas de evaporación de bandeja), la eficiencia del sistema de riego, la intensidad de precipitación del sistema de riego y la fracción de lavado de sales:

$$TR \text{ (min d}^{-1}\text{)} = \frac{ETc \text{ mm d}^{-1}}{Ef \times IP \text{ (mm h}^{-1}\text{)} \times (1 - FL)} \times 60$$

Donde:

ET_c: Evapotranspiración del cultivo, mm d⁻¹

Ef: Eficiencia del sistema de riego (en riego por goteo es 90% = 0,9)

IP: Precipitación del equipo de riego, 4 (mm h⁻¹).

FL: Fracción de lavado (8%=0,08)

$$TR \text{ (min d}^{-1}\text{)} = \frac{1,47}{0,9 \times 4 \times (1 - 0,08)} \times 60$$

TR = 27 minutos por día.

De esta manera, para el día 10 de septiembre en tomate bajo malla antiáfido, se determinó un tiempo de riego equivalente a 27 minutos de riego, necesarios para reponer $1,47 \text{ mm d}^{-1}$ de evapotranspiración del cultivo, estimados a partir de registros de una bandeja de evaporación.

Programación de riego en maíz choclero, a partir de los registros de una estación meteorológica automática (EMA).

La EMA está constituida por un conjunto de sensores que permiten monitorear una o más variables climáticas en forma sistemática, generando datos que son almacenados en un datalogger. Este datalogger comúnmente puede conectarse por medios inalámbricos (vía telefonía celular, satélites e internet) y recibir los registros en un computador para su posterior procesamiento. Las EMA's cuentan con un registro continuo y diario de la estimación de las necesidades hídricas de cada sector, a partir del método FAO Penman Monteith, que requiere registros de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar (Figura 2).

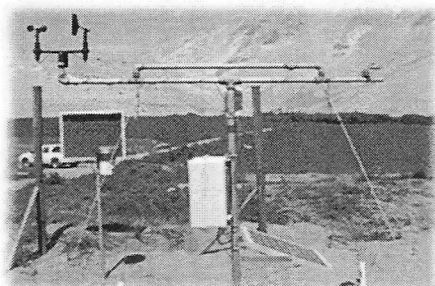


Figura 2.- Estación meteorológica automática (EMA).

Los componentes mínimos que requiere una estación meteorológica automática para la estimación de la ETo incluyen:

- Datalogger (memoria de registros y almacenajes).

- Sensores (temperatura, humedad relativa, radiación solar, y velocidad del viento).
- Sistemas de comunicación, de energía y soporte.
- Estructura de protección o cerco perimetral.

Los registros de una completa red de estaciones agrometeorológicas están disponibles en el sitio (www.agroclima.cl), a partir del cual se pueden obtener valores diarios de ETo para cada una de las EMA's instaladas en el Sistema Agroclimático FDF-INIA-DMC.

A continuación se presenta el registro continuo de los datos meteorológicos entregados por la estación EMA, entre el 22 y 28 de marzo de 2011 (Tabla 1), y el cálculo del tiempo de riego para el cultivo de maíz choclero en el sector medio del valle de Azapa.

Tabla 1.- Registro meteorológico entregado por la estación meteorológica automática EMA ubicada en el sector medio del valle de Azapa.

Fecha	Vel. Vto. (m/s)	Radiación MJ/m ² d	Temperatura		Humedad		ET ₀ mm día ⁻¹
			Máxima (°C)	Mínima (°C)	Máxima (%)	Mínima (%)	
22 Marzo	2,38	25,0	26,3	13,2	81,1	42,2	5,06
23 Marzo	2,55	25,0	26,3	13,6	80,9	42,6	5,12
24 Marzo	2,52	24,4	26,5	13,3	81,2	42,6	5,05
25 Marzo	2,59	24,4	26,3	14,1	79,6	41,1	5,09
26 marzo	2,55	24,1	26,8	13,6	79,0	41,7	5,12
27 Marzo	1,94	23,0	26,8	13,1	81,2	41,2	4,62
28 Marzo	2,27	24,1	26,7	13,7	79,7	41,5	4,95

Ejemplo de programación de riego a partir de los registros meteorológicos de una estación meteorológica automática (EMA).

La estación meteorológica automática está ubicada en el sector medio del valle de Azapa, cercano al predio cultivado con maíz choclero al aire libre. La intensidad de precipitación del sistema de riego equivale a $11,76 \text{ mm h}^{-1}$ y la fracción de lavado corresponde a 18% (0,18), considerando que la conductividad eléctrica máxima que tolera el cultivo de maíz es 10 dS m^{-1} .

A continuación, se presenta una propuesta de programación de riego para el cultivo de maíz choclero para satisfacer los registros de ETo del día 27 de marzo de 2011.

- Evapotranspiración de cultivo

Para reponer la altura de agua (mm) diarios de agua evapotranspirados el día anterior, es necesario conocer la ETo FAO Penman-Monteith computada a partir de los registros de EMA más cercana al cultivo, para el día 27 de marzo. Conociendo esta altura de agua, se multiplica por el coeficiente de cultivo de maíz, en la siguiente relación:

$$ET_c \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = ETo \times K_c$$

$$ET_c \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = 4,62 \times 0,95$$

$$ET_c \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = 4,39 \text{ mm d}^{-1}$$

- Tiempo de Riego

Al igual que en el ejemplo anterior, el tiempo de riego (minutos al día) se determina considerando la evapotranspiración del cultivo (determinada en este ejemplo a partir de la EMA), la eficiencia del sistema de riego, la intensidad de precipitación del sistema de riego y la fracción de lavado de sales:

$$TR \text{ (min d}^{-1}\text{)} = \frac{ET_c \text{ mm d}^{-1}}{Ef \times IP \text{ (mm h}^{-1}\text{)} \times (1 - FL)} \times 60$$

Donde:

ETc: Evapotranspiración del cultivo, mm d⁻¹.

Ef: Eficiencia del sistema de riego (en riego por goteo es 90% = 0,9)

IP: Intensidad de precipitación del sistema de riego (11,76 mm h⁻¹)

FL: Fracción de lavado (18% = 0,18)

$$TR \text{ (min d}^{-1}\text{)} = \frac{4,39}{0,9 \times 11,76 \times (1 - 0,18)} \times 60$$

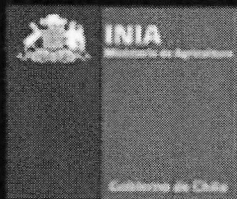
TR = 30 minutos de riego por día.

De esta manera, para el día 27 de marzo en maíz choclero al aire libre, se determinó un tiempo de riego equivalente a 30 minutos de riego, necesarios para reponer 4,62 mm d⁻¹ de evapotranspiración del cultivo, estimados a partir de registros meteorológicos.

Comentarios finales

Generalmente los métodos de programación del riego utilizados por los agricultores del valle de Azapa se basan en la experiencia y costumbre del agricultor, basada en la observación del cultivo, marchitez de hojas y/o determinación de la humedad del suelo mediante el tacto.

Actualmente, existe una red de estaciones meteorológicas (www.agroclima.cl) que entrega registros de evapotranspiración que permiten apoyar la programación del riego. Localmente, el agricultor también puede instalar bandejas de evaporación para medir de manera objetiva la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. Ambas alternativas tecnológicas pueden ser utilizadas fácilmente por los agricultores del valle de Azapa, permitiendo conservar el recurso hídrico y reducir los costos de producción.



INFORMATIVO INIA - URURI

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, CENTRO DE INVESTIGACIÓN ESPECIALIZADO EN AGRICULTURA DEL DESIERTO Y ALTIPLANO (CIE),
INIA URURI, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. MINISTERIO DE AGRICULTURA.
INFORMATIVO N° 46, Junio 2011

Manejo del riego para mitigar el impacto de la salinidad en cultivos

Alejandro Antúñez B.

Ing. Agrónomo Ph.D., INIA La Platina

Juan Pablo Martínez C.

Dr. Ing. Agrónomo, INIA La Cruz

Eduardo Carvallo G.

Ing. Agrónomo, INIA Ururi

Jaime Otárola A.

Ing. Agrónomo, INIA Ururi

La salinidad es uno de los principales estreses ambientales que afecta la productividad y calidad de los cultivos. Alrededor de 800 millones de hectáreas se encuentran afectadas por salinidad, cerca de la mitad son considerados suelos salinos, mientras que la superficie restante posee altos contenidos de sodio, carbonatos y bicarbonatos. Se estima que el cambio climático incrementará la superficie de tierras semiáridas y salinas, producida principalmente por una reducción en las precipitaciones, condiciones similares a las de la zona central y norte de Chile. Mientras que

los suelos afectados por sales se presentan extensivamente bajo condiciones naturales, los problemas de salinidad en suelos destinados a la agricultura se encuentran en aumento también producto del manejo del riego.

Por esta razón, el proyecto "Modelación de Sistema de Agricultura de Precisión" ejecutado por INIA y financiado por fondos FIC-FIA, ha preparado esta cartilla como apoyo a la programación de riego para la mitigación de los efectos de salinidad. Es importante considerar que la lixiviación de sales será la principal medida de manejo para mitigar la salinidad, por lo que la adecuada determinación de los volúmenes de agua requeridos será esencial para controlar este problema.

Tipos y causas de la salinidad en los suelos

La acumulación de sales durante largos períodos de tiempo, a través de procesos naturales en suelos o aguas subterráneas, se denomina



Estudio "Modelación de Sistema de Agricultura de Precisión"
Financia FIC Región de Arica y Parinacota - Código FIA ES
2009-0666

salinidad primaria, y es causada por dos procesos naturales. El primer proceso es el desgaste de materiales parentales, que contienen sales solubles. Los procesos de meteorización descomponen las rocas y liberan sales solubles de distintos tipos, principalmente cloruro de sodio, calcio y magnesio, siendo el cloruro de sodio el más soluble.

El otro proceso es el depósito de sal que proviene del océano, transportadas por el viento y la lluvia, estas sales son denominadas "sales cíclicas", referidas principalmente a cloruro de sodio (NaCl). El viento las transporta tierra adentro y son depositadas por la lluvia, mientras que la concentración de sales disminuye con la distancia a la costa.

La salinidad secundaria se refiere a la influencia antropogénica del equilibrio

hidrológico de la tierra entre el agua aplicada (riego o lluvia) y el agua utilizada por los cultivos (transpiración). Las causas más comunes son el desmonte de tierras y la sustitución de la vegetación perenne con cultivos anuales y el riego con aguas ricas en sal o con drenaje insuficiente.

Unidades de medida de la salinidad

La salinidad del suelo se mide por la conductividad eléctrica (C.E.) del extracto saturado. De acuerdo al Sistema Internacional de Unidades, la unidad de medida de la C.E. es dS m^{-1} (equivalente a la antigua unidad mmhos cm^{-1}). En la Tabla 1 se muestran unidades de medición de la salinidad y los respectivos factores de conversión.

Tabla 1. Unidades de medida de la salinidad y factores de conversión.

Unidades	Aplicación	1 dS m^{-1} es equivalente a:	Unidades equivalentes
Conductividad (dS m^{-1})	Suelos	1	$1 \text{ dS m}^{-1} = 1 \text{ mS cm}^{-1} = 1 \text{ mmho cm}^{-1}$
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	De riego y agua de ríos	$1000 \mu\text{S cm}^{-1}$	$1 \mu\text{S cm}^{-1} = 1 \mu\text{mho cm}^{-1}$
Total de sales disueltas (mg L^{-1})	De riego y agua de ríos.	640 mg L^{-1} (aprox.)	$1 \text{ mg L}^{-1} = 1 \text{ mg kg}^{-1} = 1 \text{ ppm}$

Fuente: Munns (2011).

Clasificación de los suelos respecto de la conductividad del extracto saturado

La conductividad del extracto saturado se mide después de tomar una porción de la muestra de suelo

que se mezcla con agua destilada hasta formar una pasta saturada, con el objetivo de extraer sales solubles mediante una filtración. Los suelos se han clasificado en cinco respecto de la C.E. del extracto saturado (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de suelos respecto de la C.E del extracto saturado.

Clasificación	Grado de salinidad	C.E. (dS m ⁻¹)	Efecto en los cultivos
A	Bajo	< a 2	Ningún efecto sobre el crecimiento
B	Leve	2 a 4	Leve efecto sobre el crecimiento
C	Alto	4 a 8	Disminución en el rendimiento
D	Muy alto	8 a 16	Pocos cultivos soportan estas condiciones
E	Extremadamente alto	> a 16	Mayores restricciones para los cultivos que la anterior

Fuente: INIA (2011).

Problema de la salinidad en suelos agrícolas

La salinidad en agricultura se asocia a suelos con pH básico entre 7,5 y 8,5 dependiendo de la cantidad de bases presentes en el suelo, siendo los cloruros (Na) y carbonatos (Ca) los que se encuentran en mayor proporción en zonas donde se cultiva el tomate. Los suelos sódicos poseen exceso de Na en los sitios de intercambio y alta concentración de carbonatos y aniones bicarbonatos. Los carbonatos se caracterizan por poseer una baja disponibilidad de nutrientes disponibles para las plantas (por ejemplo, Fe, Mn, Cu, Zn y P) debido a una menor solubilidad de estos elementos a un pH elevado y la formación de complejos de calcio insolubles. En el caso de los suelos salinos, predominan los iones sodio, con dominancia de aniones cloruros y sulfatos. Los valores de saturación de

Na y pH son bajos, pero las conductividades eléctricas superan los 4 dS m⁻¹. La salinidad de un suelo cultivado puede generar serias restricciones en el crecimiento de las plantas, afectando el rendimiento y causando una menor calidad de la producción. Por lo anterior, es importante controlar la salinidad del medio, especialmente en los cultivos de los valles de Azapa y Lluta en la región de Arica y Parinacota.



Foto 1.- Sales acumuladas en el borde de la fracción de suelo mojado en riego por goteo.

La salinidad en la Región Arica y Parinacota

Los suelos de los valles de Lluta y Azapa, se caracterizan por poseer condiciones edafo-climáticas favorables para el rubro hortícola, aunque con frecuencia se encuentran limitantes productivas asociadas al exceso de sales presentes en las aguas y suelos de la Región. El agua del río Lluta posee alta salinidad, con conductividades eléctricas (C.E.) sobre los 2 dS m^{-1} y concentraciones de boro que sobrepasan las 11 ppm, provenientes de afluentes del río en su curso superior. El valle de Azapa en tanto, tiene agua de mejor calidad, con C.E. mayor a 1 dS m^{-1} y concentraciones de boro que no superan 1 ppm. En esta Región, debido a la falta de precipitaciones, el lavado de estas sales es localizada a partir del agua de riego, por lo que su manejo se relaciona con un adecuado control de la salinidad en los cultivos.

El problema para los cultivos se manifiesta si la salinidad se acumula en la zona de las raíces, hasta un grado tal que la planta se afecta por estrés salino, por efecto osmótico o por la toxicidad específica de los iones Foto 1.



Foto 2.- Cultivo de frutilla afectado por la salinidad en el Valle de Azapa.

Cálculo de los suministros de agua requerida para la lixiviación

El aporte de agua para lixiviación debe equivaler a un volumen de agua igual o superior a los requerimientos potenciales de la planta para producir un efecto dilución de la salinidad a un nivel que no afecte el rendimiento de los cultivos. El agua requerida para lixiviación depende de la calidad del agua de riego y la tolerancia a la salinidad específica del cultivo.

Para el cálculo de los requerimientos de lixiviación se utilizan la C.E. del agua riego, del agua de drenaje y de la solución del suelo. Es común que las aguas de riego contengan sales disueltas que se acumulan en el suelo.

En el riego localizado (por goteo), las sales pueden ser lixiviadas mediante una mayor aplicación de agua que la requerida por el cultivo durante el período del cultivo. Este exceso de agua mueve el total o al menos una parte de las sales por debajo de la zona radical por lixiviación. La remoción de sales por lixiviación debe ser igual o superior a las adicionadas por el agua aplicada, de lo contrario, las sales se acumulan y eventualmente llegan a concentraciones perjudiciales.

Fracción de lavado. La mitigación de los efectos negativos de la salinidad en los suelos agrícolas se realiza mediante la determinación de la fracción de lavado (FL). Para estimar la fracción de lavado, se debe conocer tanto la conductividad eléctrica del agua de riego (CEw) y extracto saturado del suelo (CEes), como el grado de tolerancia a la salinidad de los cultivos, expresada en la reducción porcentual del rendimiento a un determinado nivel de salinidad. En la Tabla 1 se presenta la tolerancia a la salinidad de algunos cultivos hortícolas.

Tabla 1.- Tolerancia de algunos cultivos hortícolas a la salinidad del agua de riego y extracto saturado.

Hortalizas	100%		75%		50%		0%	
	CEes	CEw	CEes	CEw	CEes	CEw	CEes	CEw
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	2,5	1,7	5,0	3,4	7,6	5,0	13	8,4
Maíz (<i>Zea mays</i>)	1,7	1,1	3,6	2,5	5,9	3,4	10	6,7
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	2,5	1,7	4,4	2,9	6,3	4,2	10	6,8
Pimiento (<i>Capsicum annuum</i>)	1,5	1,0	3,3	2,2	5,1	3,4	8,6	5,8
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	1,2	0,8	3,1	2,1	5,0	3,4	8,9	5,9
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	1,2	0,8	2,8	1,8	4,3	2,9	7,4	5,0

Fuente: FAO

La fracción de lavado (FL) se determina mediante la siguiente relación:

$$FL = \frac{CEw}{2 \times CEes}$$

Donde:

FL: Fracción de lavado mínima necesaria para controlar las sales dentro de la tolerancia (CEes) del cultivo.

CEw: Salinidad del agua de riego aplicada en dS m⁻¹

CEes: Tolerancia a la salinidad del suelo por el cultivo, medida en el extracto de saturación del suelo.

Ejemplo de Fracción de Lavado

Las necesidades netas de riego (NRn) de un cultivo de maíz en el valle de Azapa corresponden a 3,08 mm día⁻¹. El agua de riego posee una CEw de 0,9 dS m⁻¹; mientras que la CEes corresponde a 10 dS m⁻¹. ¿Cuál es la FL que se requiere para desplazar las sales que se encuentran en el suelo y cuánto volumen de agua en mm día⁻¹ se debe agregar?

La fracción de lavado se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$FL = \frac{CEw}{2 \times CEes}$$

$$FL = \frac{0,9}{2 \times 10} = 0,045$$

A partir de la fracción de lavado (FL), se determina la altura de agua a aplicar (V), de acuerdo a la siguiente ecuación:

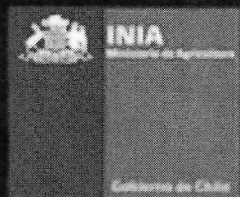
$$V = \frac{NRn}{1 - FL}$$

$$V = \frac{3,08}{1 - 0,045} = 3,23$$

Por lo tanto, la altura de agua de agua a aplicar para lograr desplazar las sales del suelo fuera de la zona de enraizamiento en un cultivo de maíz en el valle de Azapa corresponde a 3,23 mm día⁻¹, equivalentes a 3,23 L m⁻² ó 32,3 m³ ha⁻¹.

Comentario final

Finalmente, es importante destacar que la altura de agua calculada como requerimiento de lixiviación es independiente del volumen de agua que satisface los requerimientos de evapotranspiración del cultivo (ET_c). En otras palabras, la altura de agua de riego a aplicar en un cultivo afectado por salinidad, corresponderá la suma de las necesidades de evapotranspiración del cultivo (afectada por la eficiencia del sistema de riego) y el requerimiento de lixiviación calculado.



INFORMATIVO INIA - URURI

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, CENTRO DE INVESTIGACIÓN ESPECIALIZADO EN AGRICULTURA DEL DESIERTO Y ALTIPLANO (CIE),
INIA URURI, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. MINISTERIO DE AGRICULTURA.
INFORMATIVO N° 47, Junio 2011

Respuesta del maíz choclero al exceso y déficit de riego en el valle de Azapa

Alejandro Antúnez B.

Ing. Agrónomo Ph.D., INIA La Platina

Eduardo Carvallo G.

Ing. Agrónomo, INIA Ururi

Jaime Otárola A.

Ing. Agrónomo, INIA Ururi

Héctor Subiabre A.

Ing. Agrónomo, INIA Ururi

La mayor parte del área regada en Chile, se caracteriza por presentar climas áridos o semiáridos, con períodos de escasa o nula disponibilidad de agua. El proyecto “Modelación de Sistema de Agricultura de Precisión”, ejecutado por INIA y financiado por fondos FIC – FIA, plantea el desarrollo de una estrategia de manejo del riego basándose en la aplicación de diferentes regímenes hídricos en función de la reposición de la evapotranspiración del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). A continuación

se describen los resultados obtenidos en el marco del proyecto.

Demanda de agua del cultivo de maíz

El déficit hídrico afecta a los cultivos en diferente grado, incluso en un mismo cultivo la sensibilidad a este estrés difiere en sus distintas etapas de desarrollo. En general los períodos más sensibles o críticos, son floración y crecimiento del fruto. De esta forma, es posible enfrentar un período de escasez, ahorrando agua en ciertas etapas de desarrollo del cultivo, y enfrentar los periodos críticos del cultivo aumentando la eficiencia agronómica del agua de riego.

El maíz es una especie relativamente tolerante a las deficiencias de agua durante el período vegetativo y de maduración. El déficit de agua durante el período de floración, incluyendo la formación de la



Estudio “Modelación de Sistema de Agricultura de Precisión”

Financia FIC Región de Arica y Parinacota - Código FIA EST 2009

0666

inflorescencia y estigmas y la polinización, causa una fuerte disminución del rendimiento. La escasez de agua en el período de floración, resulta en la reducción del rendimiento o en mazorcas sin granos relacionada con la desecación de los estigmas. Si la deficiencia de riego se sucede en el período de formación del grano, la reducción del rendimiento se produce por la disminución del tamaño de éstos. Este efecto es menos pronunciado cuando las plantas ya han sufrido un déficit moderado de agua en el período vegetativo, puesto que en esas condiciones la planta ha desarrollado un sistema radical que le permite absorber agua a mayor profundidad. El déficit de agua durante el período de maduración, tiene poco efecto sobre el rendimiento de granos.

La evapotranspiración de un cultivo es el proceso por el cual el agua se transfiere desde el suelo hacia la atmósfera, e incluye la evaporación directa desde el suelo y la transpiración desde la planta. Está influenciada principalmente por factores climáticos tales como radiación, humedad relativa, temperatura y viento, y factores de cultivo como especie, manejo agronómico y estado fenológico.

La demanda de la atmósfera se caracteriza por medio de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), y puede estimarse

por métodos directos e indirectos, siendo el método FAO 56 Penman Monteith, es el más utilizado.

Programación de riego en maíz, a partir de los registros de una estación meteorológica automática (EMA)

Descripción del ensayo

El ensayo se realizó durante la temporada 2011, en el predio Alto Los Albarracines, ubicado en el Kilómetro 8,5 de la carretera A-22, en Arica, Región de Arica y Parinacota. Se sembró maíz choclero, para obtener plantas a una distancia de 0,2 m sobre hilera y 1,7 m entre hilera (doble hilera) dispuestas en orientación norte-sur, en una densidad de $58.823 \text{ pl ha}^{-1}$, a cosecha. La intensidad de precipitación del sistema de riego equivale a $11,76 \text{ mm h}^{-1}$, mientras que la fracción de lixiviación de sales se estimó en 18%.

La EMA se ubica en el sector medio del valle de Azapa, cercano al predio, y permite estimar por medio de un registro continuo y diario las necesidades hídricas del cultivo de referencia (ET_0), a partir del método FAO 56 Penman Monteith.

Tratamientos de riego

Los tratamientos de riego se iniciaron cuando las plantas, en promedio, desarrollaron cuatro hojas

verdaderas, debido a que en este estado comienza el crecimiento de pelos radicales, que son los que básicamente absorben el agua de riego aplicada. Los tratamientos consistieron en tres diferentes regímenes hídricos, durante toda la temporada, difiriendo en la reposición de la evapotranspiración de cultivo (ET_c):

- T0: Reposición equivalente al 100% de la ET_c .
- T1: Reposición equivalente al 80% de la ET_c .
- T2: Reposición equivalente al 120% de la ET_c .

Los tratamientos fueron regulados por medio de un sistema de riego por goteo con tuberías de polietileno con goteros de caudal equivalente a 2 L h^{-1} , independiente del equipo existente en el predio. La lámina de agua de riego aplicada a cada tratamiento, se controló por medio del tiempo de riego.

Resultados

En la Tabla 1, se muestran los coeficientes de cultivo (K_c) empleados en cada etapa vegetativa, para la programación de riego en maíz.

Tabla 1.- Coeficientes de cultivo (K_c) para el cultivo de maíz en el Valle de Azapa.

Etapa fenológica	K_c
V4 (4 hojas)	0,4
V6 (6 hojas)	0,6
V8 (8 hojas)	0,8
V10 (10 hojas)	0,95
V12 (12 hojas)	1,0
VT (aparición de panoja)	1,1
R1 (emergencia de estigma)	1,2
R3 (grano lechoso)	1,1
R4 (grano pastoso)	1,0
R5 (grano dentado)	0,8
R6 (madurez fisiológica)	0,4

Fuente: Ojeda y Bustamante *et. al.* (2006)

Junto con la aplicación de los tratamientos de riego, se registró el agua aplicada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) durante la

temporada, en cada etapa fenológica del maíz.

Tabla 2.- Volúmenes de agua aplicada a los tratamientos de riego ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en el cultivo de maíz en el Valle de Azapa.

Etapa Fenológica	Agua Aplicada $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$		
	T0	T1	T2
Cuatro hojas – ocho hojas	890	712	1.068
Ocho hojas - aparición de panoja	1.124	899	1.348
Aparición de panoja - emergencia de estigma	299	239	358
Emergencia de estigma - grano acuoso	499	399	599
Grano acuoso - grano lechoso	469	375	562
Grano lechoso - grano pastoso	494	395	592
Grano lechoso - grano dentado	488	390	585
Grano dentado - madurez fisiológica	290	232	348
Total	4.553	3.641	5.460
ET _c	100%	80%	120%

Se realizó un monitoreo continuo al contenido de agua en el suelo, por medio de una sonda de capacitancia del tipo FDR (modelo Diviner 2000). En el Gráfico 1, se muestra el contenido de agua en el suelo de los tratamientos control, deficitario y excedentario en un suelo franco-limoso, durante la temporada de riego. El límite superior corresponde

al contenido de agua a capacidad de campo (CC), mientras el límite inferior o umbral de riego representa la fracción de agua disponible remanente en el suelo. El recuadro celeste representa el rango permisible de agua en el suelo definido para no afectar el rendimiento del cultivo.

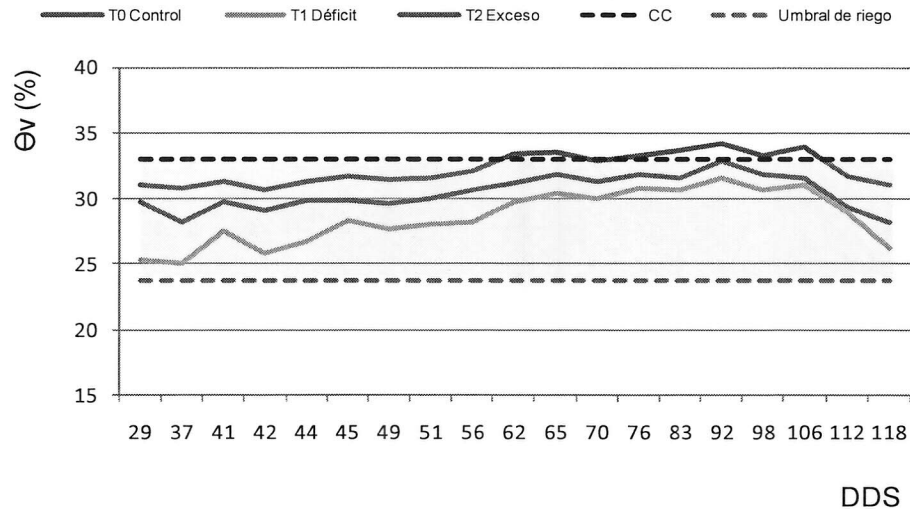


Gráfico 1.- Contenido volumétrico de agua en el suelo en los tres tratamientos de riego en maíz en el Valle de Azapa.

Para evaluar el efecto de los regímenes hídricos en el desarrollo del cultivo, se evaluó periódicamente la altura de planta y el índice de área foliar. Además se registró la conductancia estomática de las hojas de plantas sometidas a los distintos tratamientos de riego.

En el Gráfico 2 se muestra la altura de plantas sometidas a tres regímenes hídricos diferentes, en la temporada de riego. En la fase inicial,

se observa un lento crecimiento con poca diferencia de altura de plantas

entre tratamientos. A partir de la aparición de ocho hojas verdaderas, el cultivo entra en una fase de crecimiento rápido, reflejado en un mayor crecimiento en plantas del tratamiento control (100% ET_c). Esta tendencia se mantiene en la fase de floración y maduración del fruto, con una tasa de crecimiento que tiende a disminuir paulatinamente.



Cultivo de maíz, etapa vegetativa (4 hojas)



Cultivo de maíz, etapa reproductiva (VT)

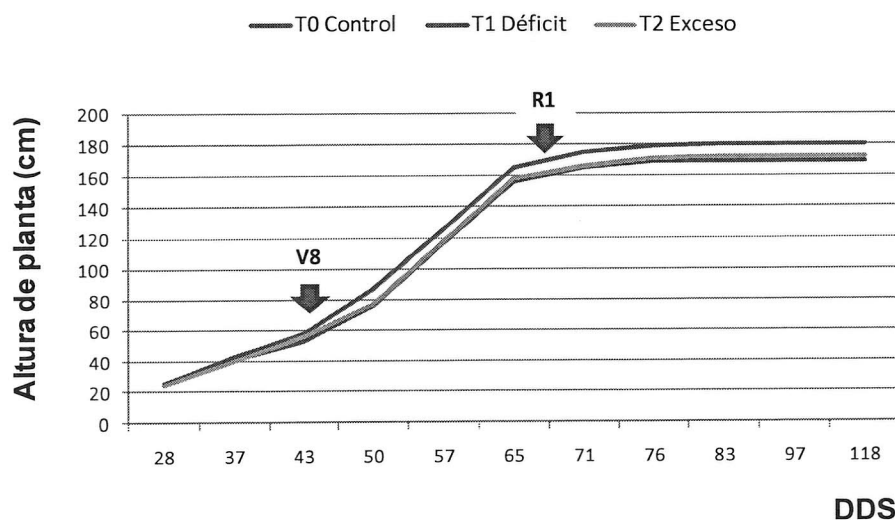


Gráfico 2.- Evolución de altura de plantas de maíz sometido a tres regímenes de riego, en la temporada.

De esta forma, se observó que la aplicación de agua al cultivo por sobre la aplicada al tratamiento control, no necesariamente resulta en una mayor altura de planta. Además, se concluye que el déficit de agua en el suelo (T1 80% ETc) produce un menor crecimiento de la planta.

La pérdida de vapor de agua a través de los estomas de hojas de plantas de maíz es uno de los factores que relaciona la transpiración con la temperatura ambiente, presión,

humedad y velocidad del viento. La conductancia estomática es un parámetro indirecto de estrés hídrico que mide la velocidad de paso dióxido de carbono (CO_2) o el vapor de agua a través de los estomas de las hojas. En el Gráfico 3, se observa la evolución de la conductancia estomática a lo largo del cultivo en los tres tratamientos de riego, observándose que a partir de la etapa reproductiva, la conductancia es menor en condiciones de riego deficitario (T1 80% ETc).

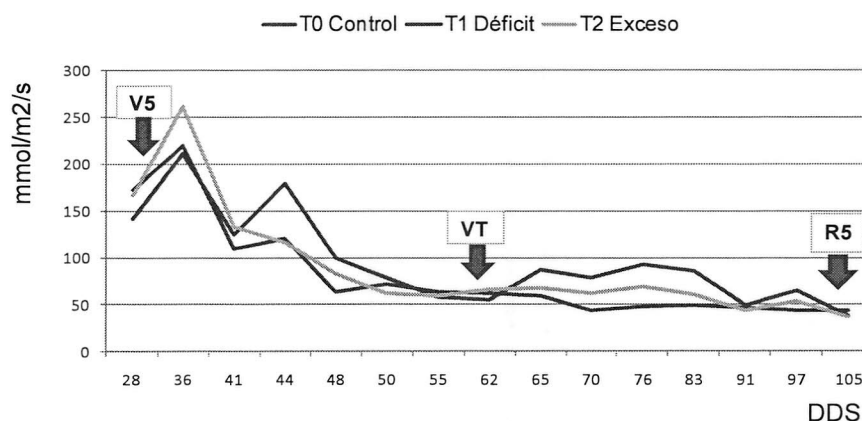


Gráfico 3.- Evolución de la conductancia estomática en el cultivo de maíz sometido a tres regímenes de riego en el Valle de Azapa.

Los componentes del rendimiento fueron evaluados según número de granos por mazorca y gramos por mazorca, para obtener el rendimiento expresado en toneladas por hectárea (Tabla 2). Los tratamientos control y excedentario no mostraron

diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Plantas regadas con el tratamiento deficitario (T1, 80% de ET_c) tuvieron un rendimiento significativamente menor comparado con plantas del tratamiento control y excedentario.

Tabla 2.- Rendimiento y sus componentes de los distintos tratamientos, en cultivo de maíz sometido a tres regímenes de riego, en el Valle de Azapa.

Tratamiento	N° granos/mazorca	g/mazorca	Rendimiento (ton ha ⁻¹)
Control (T0 100% ET_c)	372 a	95,8 a	8,07 a
Deficitario (T1 80% ET_c)	284 b	77,1 b	6,10 b
Excedentario (T2 120% ET_c)	382 a	100,1 a	8,17 a

* Letras distintas en la misma columna implican diferencias estadísticamente significativas.

En el Gráfico 5 se resume el rendimiento (ton ha⁻¹) del maíz en los distintos tratamientos en relación al agua aplicada (m³ ha⁻¹) en la temporada. El tratamiento deficitario

obtuvo un rendimiento de 6,10 ton ha⁻¹ con 3641 m³ ha⁻¹ de agua aplicada, con una diferencia de 1,97 ton ha⁻¹ en comparación al tratamiento control.

En otros términos, el aumento del 20% en el agua aplicada, se refleja en un aumento del orden del 32% en el rendimiento. Es importante señalar, que en el tratamiento de riego excedentario no se registran diferencias estadísticamente

significativas en rendimiento con respecto al control. De esta forma, se concluye que el exceso de riego por sobre los requerimientos estimados de ET_c en maíz en el Valle de Azapa, no se justifica al no tener efecto sobre el rendimiento del cultivo.

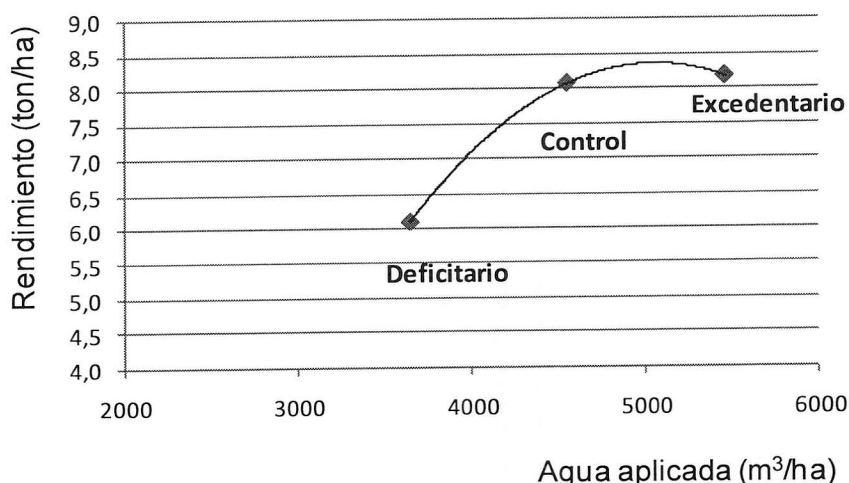


Gráfico 5.- Agua aplicada ($m^3 ha^{-1}$) versus rendimiento ($ton ha^{-1}$) en cultivo de maíz, en tres tratamientos de riego en el Valle de Azapa.

Conclusión

Los coeficientes de cultivo (K_c) aplicados al tratamiento control (entre 0,4 en etapa inicial vegetativa y 1,2 en etapa reproductiva) resultaron adecuados, satisfaciendo la demanda evapotranspirativa del cultivo y resultando en un rendimiento óptimo para el cultivo de maíz en el Valle de Azapa.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las empresas Massai Agricultural Services y Pioneer Ltda. por su valiosa participación en el desarrollo de este ensayo.

