Principios de Agronomía para una agricultura sostenible

Trabajo Práctico

Rotación: Puerro/Pimiento rojo

Localidad: Bélmez, España

Santiago Ramón y Cajal & Deborah Harry

Enero 2014

Universidad de Córdoba

Indice

0. Información general. p. 3

1. Valores medios mensuales de variables meteorológicas p. 4

2. Valores medios mensuales de duración del día, radiación solar máxima, radiación neta sobre hierba, ET0 Penman-Monteith-FAO, ET0 Hargreaves equations y precipitación efectiva. p. 5

3. Productividad: Tiempo térmico desde siembra a cosecha, radiación PAR interceptada y rendimiento potencial. p. 7

4- Programa de fertilización. a) Necesidades promedio de P y K para la rotación. b) Necesidades de fertilizante nitrogenado para los dos cultivos. c) Coste total del programa de fertilización. p. 11

5- Programas de riego para 2012/2013 p. 15

6- Necesidades de lavado p. 21

7- Dosis de siembra para los dos cultivos p. 22

8- Probabilidad de helada posterior al 1 de Marzo p. 23

9- Calendario de operaciones. Requerimientos energéticos p. 24

10- Referencias p. 27

0. Información general

Estación meteorológica: Belmez

Provincia: Córdoba (España)
Latitud: 38º 15' 18"N
Longitud: 05º 12' 30" W
Altitud: 523 m

Cultivos: Puerro (siembra 1 Octubre, duraciones 30-30-120-30) y pimiento (siembra 1 Mayo, 20-35-40-20).

Año: 2013
Suelo textura media de 1 m de profundidad
Análisis de suelo (0-30 cm): Textura franco arenoso

Densidad aparente 1.4 t/m^3
P Olsen: 16 mg/kg
L Acetato amónico: 250 mg K/kg
Concentración materia orgánica: 1%

Sistema de riego: Aspersores con cobertura completa espaciados 12 x 12 m, con caudal 0.3 L/s y eficiencia de aplicación 0.85.
El agua de riego tiene CE= 1.5 dS/m y se toma de un pequeño embalse con una bomba accionada por un motor diésel.

1. Datos climáticos mensuales.

Al realizar este trabajo (Junio 2014), la estación meteorológica ha estado en funcionamiento desde 2000, por lo que disponemos de 13 años completos desde 2001 hasta 2013.

La Tabla 1 muestra los valores medios mensuales de temperatura máxima y mínima, radiación solar, déficit de presión de vapor (VPD), precipitación mensual, número de días de lluvia y velocidad del viento a 2 m de altura.

Las medias y totales han sido calculados usando Excel 2007.

El VPD medio ha sido calculado como:

$$VPD = \frac{e_s\,(T_{max}) + e_s\,(T_{min})}{2} - \frac{e_s\,(T_{max})\,{}^{RH_{min}}/_{100} + e_s\,(T_{min})\,{}^{RH_{max}}/_{100}}{2}$$

Mes	Tmax	Tmin	Rs	VPD	Lluvia	Días de lluvia	U
	ºC	ºC	MJ/m2/dia	kPa	mm/mes	(por mes)	m/s
1	12.5	1.6	8.7	0.36	48.2	7.62	2.13
2	13.9	1.9	12.1	0.46	52.6	7.15	2.25
3	17.1	4.8	16.1	0.62	61.8	7.85	2.33
4	19.9	6.6	21.2	0.80	59.9	7.85	2.33
5	24.8	9.7	24.9	1.25	38.1	5.69	2.03
6	31.5	14.4	28.5	2.14	10.3	2.15	2.08
7	34.6	16.4	29.9	2.74	1.6	0.31	2.22
8	34.2	16.9	26.1	2.63	10.0	1.15	2.09
9	28.7	14.0	19.7	1.67	36.7	4.15	1.94
10	22.6	10.0	13.6	0.94	82.9	7.69	2.11
11	15.8	4.5	9.5	0.49	61.4	6.85	2.15
12	13.0	1.9	7.7	0.35	69.7	6.85	1.99

2. Valores medios mensuales de duración del día, radiación solar máxima, radiación neta sobre hierba, ET0 Penman-Monteith-FAO, ET0 Hargreaves equations y precipitación efectiva.

Las ecuaciones empleadas han sido:

$$\text{Duración del día} = \mathrm{N} = 24 \cdot \frac{\mathrm{h_s}}{\pi}$$

$$\mathrm{hs} = \frac{\pi}{180} \cdot \mathrm{arc\ cos}[-\tan(\mathrm{LAT}) \cdot \tan(\mathrm{DEC})]$$

$$\mathrm{DEC} = 23.5 \cdot \cos[360 \cdot \frac{\mathrm{DOY}-172}{365}]$$

La latitud es 38.25º. La radiación solar máxima ha sido calculada como 75% de la radiación extraterrestre:

$$R_A = 37.7 \cdot d_r \cdot [\sin(\mathrm{LAT}) \cdot \sin(\mathrm{DEC}) \cdot h_s + \cos(\mathrm{LAT}) \cdot \cos(\mathrm{DEC}) \cdot \sin(h_s \cdot \frac{180}{\pi})]$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos[360 \cdot \frac{\mathrm{DOY}}{365}]$$

Radiación neta sobre hierba (albedo 0.23):

$$R_n = (1-\alpha) \cdot R_s - R_b$$

Pérdidas de onda larga:

$$R_b = \left(0.9\,\frac{n}{N} + 0.1\right)\left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right) 4.9\ 10^{-9}\ T^4$$

El cociente n/N ha sido calculado como:

$$\mathrm{n/N} = 2\ (R_s/R_A - 0.25)$$

donde R_s es la radiación solar medida. Los valores de n/N se deben encontrar en el intervalo de 0 a 1.

ET de referencia (Hargreaves):

$$ET_0 = 5.52 \cdot 10^{-3}\ K_R\ R_A\ (t_{avg} + 17.8)(t_{\max} - t_{\min})^{0.5}$$

Se ha asumido K_R=0.16 al tratarse de una localidad del interior.

ET de referencia (Penman-Monteith-FAO) :

$$ET_0 = \frac{\Delta \ R_n + 0.5 \ VPD \ U_2}{2.45\left[\Delta + 0.067\left(1 + 0.33 \ U_2\right)\right]}$$

Donde Δ (kPa K^{-1}) es la pendiente de la curva de presión de vapor en saturación en función de la temperatura y se calcula como:

$$\Delta = \frac{4098 \ e_s}{[237.3 + t]^2}$$

donde e_s es la presión de vapor en saturación y t la temperatura media.

La precipitación efectiva (mensual) ha sido calculada con la ecuación de FAO:

$P_e = 0.6 \ P - 10$ if P<70 mm

$P_e = 0.8 \ P - 24$ if P>70 mm

				ET_0	ET_0	Precipitación efectiva
Mes	Duración del día	Rs máxima	Rn	PM-FAO	Hargreaves	
	Horas	MJ/m2/día	MJ/m2/día	mm/día	mm/día	mm/mes
1	9.7	12.1	2.4	1.0	1.2	18.9
2	10.6	16.0	4.7	1.7	1.8	21.6
3	11.8	21.3	7.7	2.6	2.7	27.1
4	13.1	26.4	11.3	3.7	3.9	25.9
5	14.1	29.8	13.7	4.9	5.5	12.9
6	14.6	31.1	15.4	6.7	7.4	0
7	14.3	30.3	15.4	7.7	8.1	0
8	13.4	27.3	13.0	6.8	6.9	0
9	12.2	22.5	9.3	4.6	4.5	12.0
10	10.9	17.2	5.6	2.7	2.7	39.7
11	9.9	12.9	2.9	1.5	1.5	26.8
12	9.4	11.0	1.9	1.0	1.1	31.8

3. Productividad: Tiempo térmico desde siembra a cosecha, radiación PAR interceptada y rendimiento potencial.

3.1. Puerro sembrado el 1 de Octubre.

Las duraciones medias de las cuatro fases son 30-30-120-30. La temperatura base es 3ºC. Por tanto, usando las temperaturas medias de esta localidad, el tiempo térmico de las cuatro fases es:

Fase A (Octubre): 30 (16.3-3)= 399ºC d

Fase B (Noviembre): 30 (10.15-3)= 214ºC day

Fase C (Diciembre, Enero, Febrero, Marzo):

30 (7.4-3) + 30 (7.1-3) + 30 (7.9-3) + 30 (11-3) = 641ºC day

Fase D (Abril): 30 (13.2-3) = 307ºC day

Ahora, usando las temperaturas diarias de la campaña 2012/2013, empezando el 1 de Octubre, vamos sumando tiempo térmico hasta que acumulamos los valores indicados más arriba. Por lo tanto el fin de las 4 fases ocurrirá en las fechas siguientes:

Fase A: 2 Noviembre

Fase B: 27 Noviembre

Fase C: 7 Abril

Fase D: 4 Mayo

Después calculamos la fracción de PAR interceptada cada día en función del coeficiente de cultivo. El K_c máximo es 1.2 y el K_c final es 1.0. Para la fase A f=0.1, mientras que para la fase C, f= K_c-0.3=0.9. El valor final de f será 1.0-0.3=0.7. Los valores para la fase B se calculan por interpolación lineal entre 0.1 (2 Noviembre) y 0.9 (27 Noviembre). Los valores para la fase D se calculan por interpolación lineal entre 0.9 (7 Abril) y 0.7 (4 Mayo).

Se calcula entones la PAR interceptada cada día como:

$$0.45\, R_s\, f$$

Y sumando los valores para todo el ciclo del cultivo obtenemos una PAR interceptada total de 846 MJ m^{-2}.

La composición del puerro ha sido tomada de Villalobos y Fereres (2017). La concentración de materia seca es 17% del producto fresco. Sobre materia seca el puerro tiene 9% proteína y 2% de grasa. Asumimos que el resto (89%) está constituido por carbohidratos. Con estos datos podemos calcular la Eficiencia en el Uso de la radiación:

$$RUE = \frac{RUE_c}{(1 - HI) + HI\ (FC + 1.4\ FP + 2.5\ FF)}$$

$$= \frac{2}{(1 - 0.5) + 0.5\ (0.89 + 1.4\ 0.09 + 2.5\ 0.02)} = 1.94\ g/MJ$$

Y por tanto el rendimiento en materia seca será:

Y = HI RUE IntPAR = 0.5 x 1.94 x 846 = 819 g m^{-2}

Y el rendimiento fresco será:

Y_{fresh} = 819/0.17 = 4817 g m^{-2} = 48170 kg/ha

El rendimiento (fresco) medio en España es 33 t/ha, que es claramente inferior al rendimiento calculado. La diferencia se debe a otros factores que pueden limitar el rendimiento (déficit de agua o nutrientes, plagas y enfermedades, manejo incorrecto, etc.).

3.2. Pimiento sembrado el 1 de Mayo.

Las duraciones medias de las cuatro fases son 20-35-40-20. La temperatura base es 7ºC. Por tanto, usando las temperaturas medias de esta localidad, el tiempo térmico de las cuatro fases es:

Fase A (1 Mayo 1-20 Mayo): 20 (17.3-7)= 206ºC día

Fase B (20-30 Mayo, 1-25 Junio): 10 (17.3-7) + 25 (23-7) = 503ºC día

Fase C (26-30 Junio, Julio, 1-5 Agosto):

5 (23-7) + 30 (25.5-7) + 5 (25.6-7) = 728ºC día

Fase D (6-25 Agosto): 20 (25.6-7) = 372ºC día

Ahora, usando las temperaturas diarias de la campaña 2012/2013, empezando el 1 de Mayo, vamos sumando tiempo térmico hasta que acumulamos los valores indicados más arriba. Por lo tanto el fin de las 4 fases ocurrirá en las fechas siguientes:

Fase A: 25 Mayo
Fase B: 1 July
Fase C: 8 Agosto
Fase D: 24 Agosto

Después calculamos la fracción de PAR interceptada cada día en función del coeficiente de cultivo. El K_c máximo es 1.1 y el K_c final es 0.85 (estos son los valores medios indicados en el Apéndice 10.3 de Villalobos y Fereres, 2017).
Para la fase A f=0.1, mientras que para la fase C, f= K_c-0.3=0.8. El valor final de f será 0.85-0.3=0.55. Los valores para la fase B se calculan por interpolación lineal entre 0.1 (1 Mayo) y 0.8 (1 Julio). Los valores para la fase D se calculan por interpolación lineal entre 0.8 (1 Julio) y 0.55 (24 Agosto).
Se calcula entones la PAR interceptada cada día como:

$$0.45\ R_s\ f$$

Y sumando los valores para todo el ciclo del cultivo obtenemos una PAR interceptada total de 759 MJ m^{-2}.

En el Apéndice del capítulo 32 de Villalobos y Fereres (2017) encontramos que el pimiento rojo tiene (en base a materia seca) un 11.3% de proteína y 2.8% de grasa. Asumimos que el resto (85.9%) se compone de carbohidratos. En la Tabla 13.1 encontramos que el Indice de Cosecha del pimiento tiene un valor máximo de 0.6. Siendo optimistas asumimos un valor HI=0.55. Con estos datos podemos calcular la Eficiencia en el Uso de la radiación:

$$RUE = \frac{RUE_c}{(1 - HI) + HI\ (FC + 1.4\ FP + 2.5\ FF)}$$

$$= \frac{2}{(1 - 0.55) + 0.55\ (0.859 + 1.4\ x\ 0.113 + 2.5\ x\ 0.028)}$$

$$= 1.90\ g/MJ$$

Y por tanto el rendimiento en materia seca será:

Y = HI RUE IntPAR = 0.55 x 1.90 x 759 = 797 g m^{-2}

De acuerdo con el Apéndice 24.1 (Villalobos y Fereres,2017) el contenido de materia seca del pimiento rojo es 12.5%, por lo que el rendimiento fresco será:

Y_{fresh} = 797/0.125 = 6374 g m^{-2} = 63740 kg/ha

El rendimiento medio de pimiento en cultivo al aire libre en Andalucía en 2012 es 32.52 t/ha (http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2013/default.aspx?parte=3&capitulo=13&grupo=6&seccion=28, acceso Mayo 2014), que es aproximadamente la mitad del rendimiento calculado. La diferencia se debe a otros factores que pueden limitar el rendimiento (déficit de agua o nutrientes, plagas y enfermedades, manejo incorrecto, etc.).

4- Programa de fertilización..

4.1. Requerimientos medios de fertilizantes de P y K para la rotación. Los residuos se dejan en el campo. Asumid que el rendimiento medio de vuestro cultivo es el 80% del valor calculado en 3c.

Strategia para P: El valor umbral para suelos de textura media está entre 10 y 12 mg/kg. Tomamos 12 mg/kg (esperamos rendimientos muy altos) así que el suelo, que tiene 16 mg/kg de P, se encuentra por encima del umbral pero por debajo del límite de mantenimiento (24 mg/kg). Por lo tanto debemos aplicar sólo la cantidad de P exportada por los dos cultivos.
Strategia para K: El nivel medido (STL =250 mg/kg) excede el umbral (175 mg/kg, Tabla 26.3, Villalobos y Fereres 2017) pero está por debajo del límite de mantenimiento (350 mg/kg) que es el doble del umbral. Debemos aplicar entonces la cantidad de K exportada por los dos cultivos.

4.1.1. Puerro
Sólo se exporta el producto cosechado. Tomamos como rendimiento medio el 80% del valor calculado en la sección 3c:

Rendimiento = 0.8 x 819 g m^{-2} = 655 g m^{-2} = 6550 kg ha^{-1}

Ahora buscamos las concentraciones de P y K (Apéndice 26.1, Villalobos y Fereres 2017): 0.21% P y 1.06% K

Por lo tanto los nutrientes exportados son:

P : 6550 kg ha^{-1} x 0.0021 kg P/kg ms = 13.8 kg P ha^{-1}

K : 6550 kg ha^{-1} x 0.0106 kg P/kg ms = 69.4 kg K ha^{-1}

Podemos elegir fertlizantes en la Tabla 23.2. Escogemos fertilizantes simples como superfosfato triple (20% P) y cloruro potásico (50% K) por lo que las cantidades a añadir son:

superfosfato triple: 13.8 kg P ha^{-1} /0.2 = 69 kg ST/ha
cloruro potásico: 69.4 kg K ha^{-1} / 0.5 = 139 kg CP/ha

4.1.2. Pimiento.
Sólo se exporta el producto cosechado. Tomamos como rendimiento medio el 80% del valor calculado en la sección 3c:

Rendimiento = 0.8 x 797 g m^{-2} = 637.6 g m^{-2} = 6376 kg ha^{-1}

Ahora buscamos las concentraciones de P y K (Apéndice 26.1, Villalobos y Fereres 2017): 0.3% P and 2.4% K

Por lo tanto los nutrientes exportados son:

P : 6376 kg ha^{-1} x 0.003 kg P/kg ms = 19.1 kg P ha^{-1}

K : 6376 kg ha^{-1} x 0.024 kg P/kg ms = 153.0 kg K ha^{-1}

Escogemos fertilizantes simples como superfosfato triple (20% P) y cloruro potásico (50% K) por lo que las cantidades a añadir son:
superfosfato triple: 19.1 kg P ha^{-1} /0.2 = 96 kg ST/ha
cloruro potásico: 153 kg K ha^{-1} / 0.5 = 306 kg CP/ha

4.1.3. Rotación
El requerimiento medio de fertilizante a largo plazo para la explotación se calcula como el promedio de todos los cultivos de la rotación:
superfosfato triple: (69 + 96)/2 = 82.5 kg ST/ha/año
cloruro potásico: (139 + 306)/2 = 222.5 kg CP/ha/año

4.2. Fertilizante nitrogenado
Ecuación general:

$$N_f = \frac{N_{end} + (1 + f_{NR})(N_{yield} + N_{res}) - k_{im}\, F_{res}\, N'_{res} - f_{NR}\,(N'_{yield} + N'_{res}) - N_{other}}{(1 - n)}$$

Asunciones

N_{end} 10 kg/ha (valor mínimo del rando indicado en 25.2.2)

f_{NR} 0.2

k_{im} 0.7 (no leguminosas con laboreo)

N_{other} 10 kg/ha (valor máximo del intervalo indicado en 25.2.3)

F_{res} 1 para puerro y pimiento ya que no se exportan residuos

1-n 0.90 (aspiramos a una alta eficiencia)

Cantidad de N en cosecha y residuos (tomando las concentraciones más bajas de apéndice 24.1)

Puerro N_{yield} = 6550 kg/ha x 0.014 kg N/kg = 91.7 kg N/ha

Puerro N_{res} = 6550 kg/ha x 0.01 kg N/kg = 65.5 kg N/ha

Pimiento N_{yield} = 6376 kg/ha x 0.019 kg N/kg = 121.1 kg N/ha

Pimiento N_{res} = 5217 kg/ha x 0.01 kg N/kg = 52.2 kg N/ha

Fertilizante con N para puerro

$$N_f = \frac{10 + (1 + 0.2)(91.7 + 65.5) - 0.7\ 52.2 - 0.2\ (121.1 + 52.2) - 10}{0.90} = 130.4\ kg\ N/ha$$

Que puede ser satisfecho con 130.4/0.46 = 284 kg urea/ha

Fertilizante con N para pimiento

$$N_f = \frac{10 + (1 + 0.2)(121.1 + 52.2) - 0.7\ 65.5 - 0.2\ (91.7 + 65.5) - 10}{0.90} = 145.2\ kg\ N/ha$$

Que puede ser satisfecho con 145.2/0.46 = 316 kg urea/ha

Por lo que el uso promedio de urea en la explotación será:

(284+316)/2 = 300 kg urea/ha

c) Coste total del programa de fertilización

Nuestro proveedor vende superfosfato triple a 300 euro/t, cloruro potásico a 550 euro/t y urea a 550 euro/t.

Tenemos que gastar :

superfosfato triple: 86.5 kg ST/ha x 0.3 €/kg = 25.95 €/ha/year

cloruro potásico: 237.8 kg CP/ha x 0.55 €/kg = 130.8 €/ha

urea: 300 kg urea/ha x 0.55 €/kg = 165 €/ha

Coste total del fertilizante (excluyendo el coste de aplicación)= 321.75 €/ha

5. Programas de riego para la campaña 2012/13

5.1. Puerro

Primero calculamos el coeficiente de cultivo inicial. Tenemos 7 días de lluvia en 33 días (Fase A). La fracción de días lluviosos es 0.21, por lo que el intervalo de humedecimiento es:

$$WI = \frac{1}{0.75\, f_w\, (1 - f_w)} = \frac{1}{0.75\, x\, 0.21\, (1 - 0.21)} = 8\ días$$

Ahora aplicamos la ecuación de K_{c1} para WI>4:

$$K_{c1} = 2\,(WI)^{-0.49} \exp\left[(-0.02 - 0.04 \ln WI) ET_{0l}\right] = 0.57$$

El K_c máximo es 1.2 y el K_c final es 1.0 (Apéndice 10.3). Con estos valores y la duración de las 4 fases podemos construir la curva de K_c (Figura 1). La ET diaria es calculada como K_c ET_0.

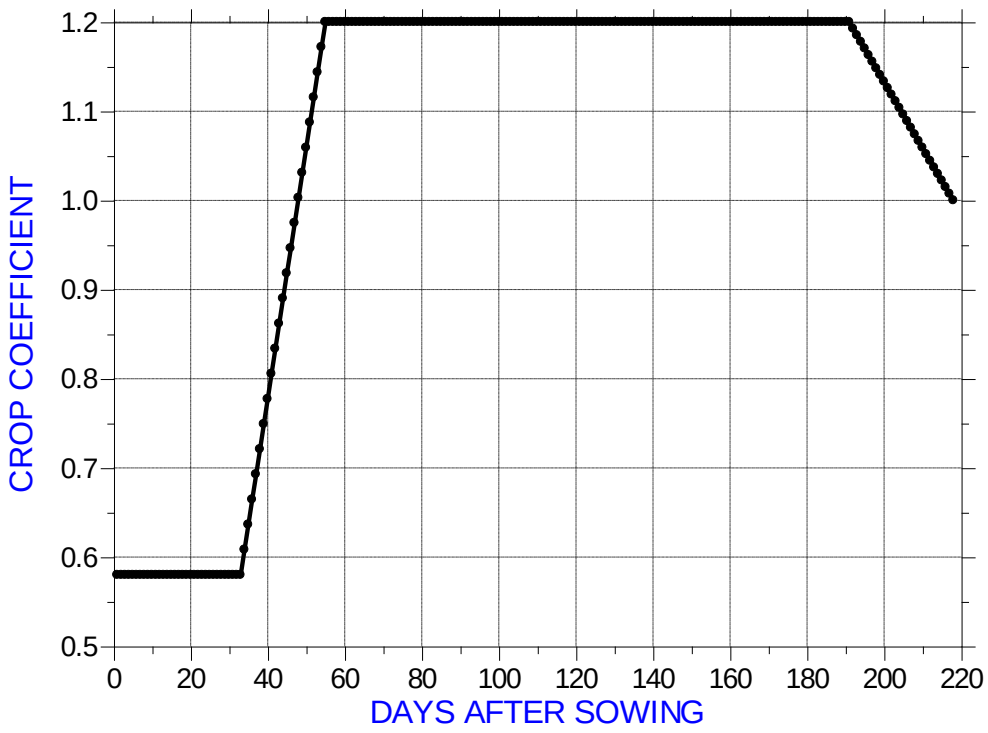

Fig. 1. Curva de coeficiente de cultivo para puerro sembrado el 1 de Octubre de 2012 en Belmez (España).

Ahora calculamos el déficit de agua en el suelo crítico. El suelo es de textura media así que tomamos PAW=120 mm/m. El valor de agotamiento permisible se calcula como:

$AD = 1- F_{AD}\ ET_0$

Donde F_{AD} =0.14 (como no encontramos el puerro en el Apéndice 10.3 hemos tomado el valor de cebolla que pertenece al mismo género). Tomamos el valor máximo de ET_0 durante el ciclo que es 3.7 mm/día (Abril), por lo que:

AD=1-0.14 x 3.7 = 0.48

La profundidad radical máxima del puerro no aparece en el apéndice 10.3. Adoptamos el valor de cebolla (intervalo 0.5-0.8 m) y usamos el valor mínimo (0.5 m) por seguridad. El déficit de agua del suelo crítico será:

$SWD_c = Z_R\ PAW\ AD = 0.50\ m \times 120\ mm/m \times 0.48 = 29\ mm$

Regaremos cuando SWD exceda de 29 mm y llevaremos el suelo hasta capacidad de campo (Fig. 2). Como la lluvia es frecuente durante gran parte del ciclo, no nos preocupamos de calcular las variaciones de SWD_c y usamos su valor máximo.

Según las reglas se deberían aplicar 5 riegos en los días (del año) 44, 104, 108, 114 y 123. Por otra parte al acabar el ciclo debemos dejar el suelo lo más seco posible. Aunque podríamos gastar el 80-90% del agua del suelo, teniendo en cuenta que este cultivo se cosecha en verde seremos precavidos y vamos a gastar el 60-70% de PAW, de forma que acabamos la campaña con SWD=36-42 mm. Eliminando el último riego conseguimos que el SWD al final sea 44 mm, así que la cantidad de riego en toda la campaña será 116 mm.

El sistema de riego permite aplicar 0.3 L/s x 3600s/h x 0.85 /(12 x 12) = 6.375 mm/hora

Por lo que el programa de riego será:

Día del año 44: 4.5 hours

Día del año 104: 4.5 hours

Día del año 108: 4.5 hours

Día del año 114: 4.5 hours

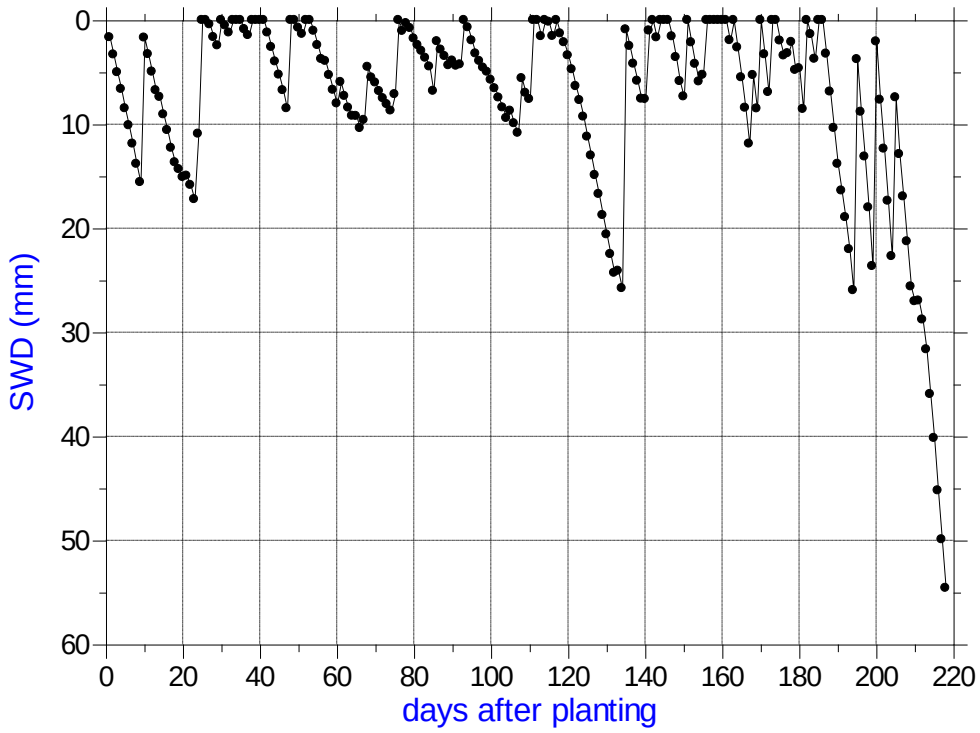

Fig. 2. Variación temporal del déficit de agua en el suelo para un cultivo de puerro sembrado el 1 de Octubre de 2012 en Bélmez (España).

5.2. Pimiento

Primero calculamos el coeficiente de cultivo inicial. Durante Mayo de 2013, que corresponde a la fase A, tenemos 5 días de lluvia y ET_0=4.4 mm/d. La fracción de días lluviosos es 0.167, y el intervalo de humedecimiento es:

$$WI = \frac{1}{0.75\, f_w\, (1 - f_w)} = \frac{1}{0.75\, x\, 0.167\, (1 - 0.167)} = 9.6\, days$$

Ahora aplicamos la ecuación de K_{c1} para WI>4:

$$K_{c1} = 2\,(WI)^{-0.49} \exp\left[(-0.02 - 0.04 \ln WI) ET_{0l}\right] = 0.41$$

El K_c máximo es 1.1 y el K_c final es 0.85 (Apéndice 10.3). Con estos valores y la duración de las 4 fases podemos construir la curva de K_c (Figura 3). La ET diaria es calculada como K_c ET_0.

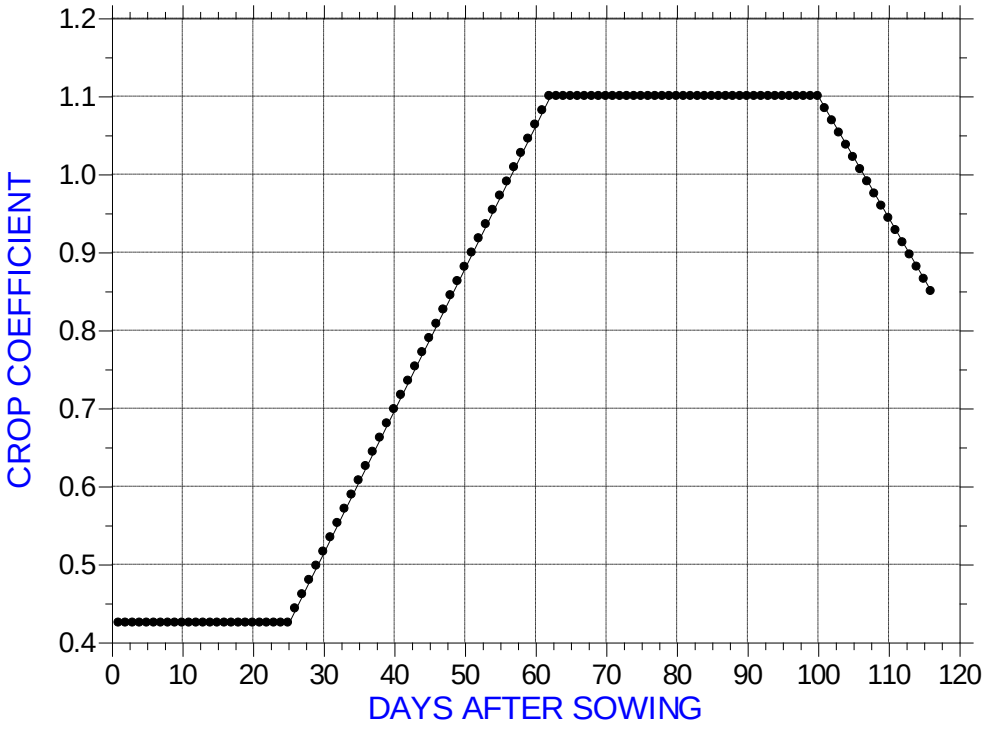

Fig. 3. Curva de coeficiente de cultivo para pimiento sembrado el 1 de Mayo de 2013 en Bélmez (España).

Ahora calculamos el déficit de agua en el suelo crítico. El suelo es de textura media así que tomamos PAW=120 mm/m. El valor de agotamiento permisible se calcula como:

$AD = 1- F_{AD}\ ET_0 = 1- 0.14 \times 7.7 = -0.08$

Como es menor de 0.2, adoptamos AD=0.2. Hemos tomado el valor máximo de ET_0 durante el ciclo que es 7.7 mm/día (Julio).

La profundidad radical máxima del pimiento se puede encontrar en el Apéndice 10.3 (Villalobos y Fereres, 2017). Adoptamos el valor máximo del intervalo (1.0 m) que además coincide con la profundidad del suelo. Hacemos esto para evitar un valor excesivamente bajo de déficit crítico que no se adecua bien a un sistema de riego por aspersión. El déficit de agua del suelo crítico será:

$SWD_c = Z_R\ PAW\ AD = 1.0\ m \times 120\ mm/m \times 0.2 = 24\ mm$

Regaremos siempre que SWD exceda 24 mm y llevaremos el suelo a capacidad de campo (Fig. 4). Durante un período en Mayo de 2013 el SWD se hace negativo lo que implica que puede ocurrir percolación pero hemos asumido que es despreciable.

De acuerdo con las reglas se deberían aplicar 23 riegos de 24 mm empezando el día del año 133 hasta el día 233. Sin embargo debemos dejar el suelo lo más seco posible al acabar la campaña.

Aunque podríamos gastar el 80-90% del agua del suelo, teniendo en cuenta que este cultivo se cosecha en verde seremos precavidos y vamos a gastar el 60% de PAW, de forma que acabamos la campaña con SWD=72 mm. Esto se consigue eliminando los dos últimos riegos de forma que en toda la campaña necesitamos aplicar 504 mm.

Como ya vimos para el puerro el sistema aplica 6.375 mm/hora, por lo que los riegos deberían durar 3.76 horas.

El programa de riegos (fechas) será:

133	159	165	172	176	179	182	185	188	191	193	197	200	203
206	210	213	216	219	222	225							

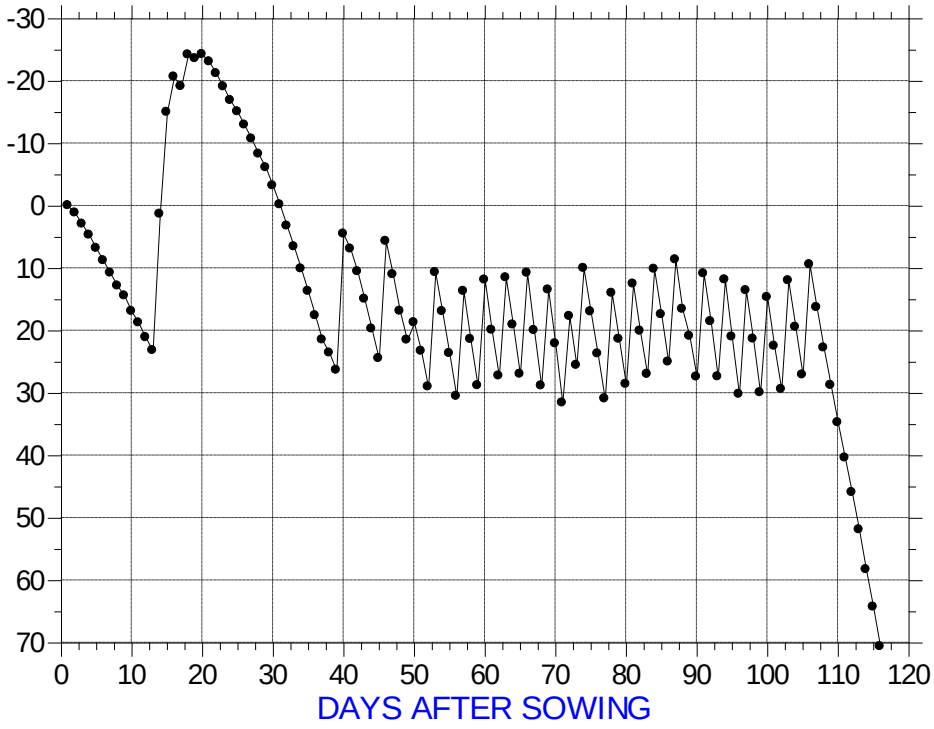

Fig. 4. Variación temporal del déficit de agua en el suelo para un cultivo de pimiento sembrado el 1 de Mayo de 2013 en Bélmez (España).

6- Necesidad de lavado

Vamos a calcular la cantidad de riego que hay que añadir al calculado en el apartado 5 para conseguir que el rendimiento sea máximo si el agua tiene EC= 1.5 dS/m.

6.1. Puerro

La Tabla 22.1 no incluye el puerro. Adoptamos los parámetros de una especie del mismo género (cebolla). El valor umbral de EC_e es 1.2 dS/m. Como tenemos riego por aspersión usamos la ecuación de cálculo de necesidad de lavado para riego de baja frecuencia:

$$LR = 0.31 \left(\frac{EC_w}{EC_{em}}\right)^{1.7} = 0.31 \left(\frac{1.5}{1.2}\right)^{1.7} = 0.45$$

Necesitamos que el drenaje sea el 45% del agua aplicada, que será entonces:

$$AW = \frac{necesidad\ neta\ riego}{1 - LR} = \frac{116}{1 - 0.45} = 211\ mm = 2110\ m^3/ha$$

Se debe aumentar la duración de los riegos. Por ejemplo

Día del año 44: 4.5 horas debería aumentarse a 8.2 hours

6.2. Pimiento

La EC_e umbral para pimiento es 1.5 dS/m (Tabla 22.1). Como tenemos riego por aspersión usamos la ecuación de cálculo de necesidad de lavado para riego de baja frecuencia:

$$LR = 0.31 \left(\frac{EC_w}{EC_{em}}\right)^{1.7} = 0.31 \left(\frac{1.5}{1.5}\right)^{1.7} = 0.31$$

Necesitamos que el drenaje sea el 31% del agua aplicada, que será entonces:

$$AW = \frac{necesidad\ neta\ de\ riego}{1 - LR} = \frac{504}{1 - 0.31} = 730\ mm = 7300\ m^3/ha$$

La duración de los riegos (3.76 h) debería incrementarse a 5.45 h.

La cantidad media de riego a usar en la explotación se calcula como el promedio de los dos cultivos:

$(2110 + 7300)/2 = 4705\ m^3\ ha^{-1}$

7- Dosis de siembra

En general usaremos semilla certificada por lo que la viabilidad será mayor del 90%. Tomamos entonces f_1=0.9, para los dos cultivos.

7.1. Puerro

En la Tabla 16.2 encontramos el peso de la semilla (2.8 mg/semilla) y la densidad de siembra de 25 plantas m^{-2}. Las semillas son muy pequeñas por lo que asumimos una baja fracción de plantas emergidas (e.g. f_2 = 0.7).

Por tanto:

$$Dosis\ de\ siembra = \frac{p_u D_p}{f_1\ f_2} = \frac{2.8\ 10^{-3}\ \ 25}{0.9\ 0.7} = 0.11\ g\ m^{-2} = 1.1\ kg/ha$$

7.2. Pimiento

En la Tabla 16.2 encontramos peso de semilla entre 5 y 10 mg/semilla (tomamos 7.5 mg/semilla) y densidad de siembra entre 4 y 6 plantas m^{-2} (tomamos 5 plantas m^{-2}). Las semillas son muy pequeñas por lo que asumimos una baja fracción de plantas emergidas (e.g. f_2 = 0.7).

Por tanto:

$$Dosis\ de\ siembra = \frac{p_u D_p}{f_1\ f_2} = \frac{7.5\ 10^{-3}\ \ 5}{0.9\ 0.7} = 0.06\ g\ m^{-2} = 0.6\ kg/ha$$

8. Probabilidad de helada después del 1 de Marzo.

Las fechas de heladas se expresan en días desde el primer día del mes en que empieza el otoño. En el hemisferio norte tomamos el 1 de Septiembre como referencia.

	Fecha de la última helada (días desde 1 Sept)
	174
	177
	201
	185
	190
	186
	204
	205
	213
	195
	196
	203
	195
Media	194
Desviación típica (días)	11.4

El 1 de Marzo se corresponde con el día 181 (días desde el 1 de Septiembre). Como todos los años hay heladas P_y=1.

$$P(helada\ después\ 181) = P_y\ \ P\left[z > \frac{t - m_{LF}}{s_{LF}}\right] = 1\ x\ \ P\left[z > \frac{181 - 194.2}{11.4}\right] =$$

$$P[z > -1.158] = \ \ P[z < 1.158] = 0.877$$

La probabilidad ha sido calculada con la ec. 29.2 (Villalobos y Fereres, 2017).

9. Calendarios de cultivo y requerimientos de energía.

Asumimos que la finca se divide en dos hojas del mismo tamaño (parcela 1 y parcela 2). La distribución de los cultivos se muestra en un diagrama muy simple (L para puerro y P para pimiento) durante los dos años de la rotación.

	Year 1												Year 2											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Field 1					P	P	P	P		L	L	L	L	L	L	L								
Field 2	L	L	L	L													P	P	P	P		L	L	L

Establecemos entonces el calendario para una de las parcelas. Por ejemplo para la parcela 1:

Año	Fecha	Operación	Parcela
1	1-Mar	Aplicar P,K y parte del N	1
1	1-Apr	Grada de disco	1
1	20-Apr	Herbicida (contacto)	1
1	1-Mayo	Siembra pimiento	1
1	10-Jun	Aplicar N al pimiento	1
1	15-Jun	Cultivador entre líneas en pimiento	1
1	31-Aug	Cosecha pimiento	1
1	1-Sep	Arado de vertedera	1
1	2-Sep	Aplicar P,K y parte del N	1
1	7-Sep	Grada de disco	1
1	25-Sep	Herbicida (contacto)	1
1	1-Oct	Siembra puerro	1
1	15-Nov	Herbicida selectivo en puerro	1
2	1-Feb	Aplicar N en puerro	1
2	30-Apr	Cosecha puerro	1
2	15-Sep	Arado de vertedera	1

El calendario de cultivo para la parcela 2 sería el mismo pero con el año cambiado. Podemos entonces establecer el calendario de cultivos para la explotación:

Año	Fecha	Operación	Parcela
1	1-Feb	Aplicar N en puerro	2
1	1-Mar	Aplicar P,K y parte del N	1
1	1-Apr	Grada de disco	1
1	20-Apr	Herbicida (contacto)	1
1	30-Apr	Cosecha puerro	2
1	1-May	Siembra pimiento	1
1	10-Jun	Aplicar N al pimiento	1
1	15-Jun	Cultivador entre líneas en pimiento	1
1	31-Aug	Cosecha pimiento	1
1	1-Sep	Arado de vertedera	1
1	2-Sep	Aplicar P,K y parte del N	1
1	7-Sep	Grada de disco	1
1	15-Sep	Arado de vertedera	2
1	25-Sep	Herbicida (contacto)	1
1	1-Oct	Siembra puerro	1
1	15-Nov	Herbicida selectivo en puerro	1
2	1-Feb	Aplicar N en puerro	1
2	1-Mar	Aplicar P,K y parte del N	2
2	1-Apr	Grada de disco	2
2	20-Apr	Herbicida (contacto)	2
2	30-Apr	Cosecha puerro	1
2	1-May	Siembra pimiento	2
2	10-Jun	Aplicar N al pimiento	2
2	15-Jun	Cultivador entre líneas en pimiento	2
2	31-Aug	Cosecha pimiento	2
2	1-Sep	Arado de vertedera	2
2	2-Sep	Aplicar P,K y parte del N	2
2	7-Sep	Grada de disco	2
2	15-Sep	Arado de vertedera	1
2	25-Sep	Herbicida (contacto)	2
2	1-Oct	Siembra puerro	2
2	15-Nov	Herbicida selectivo en puerro	2

El cálculo de necesidades de energía se muestra en la Tabla siguiente:

Operaciones	Número de operaciones en 2 años en 1 ha (0.5 ha pimiento, 0.5 ha de puerro	Número de operaciones por ha y por año	Energía total por operación por ha	Energía total
	Número / ha/2 años	Número /ha/año	MJ/ha/ año	MJ/ha/ año
Siembra puerro	1	0.5	340	170
Siembra pimiento	1	0.5	340	170
Aplicación abono	4	2	90	180
Labor vertedera	2	1	1200	1200
Grada o cultivador	3	1.5	300	450
Aplicación pesticida	3	1.5	90	135
Cosecha pimiento	1	0.5	1200	600
Cosecha puerro	1	0.5	1200	600

Inputs	Cantidad por año y por ha de explotación	Unidades	Energía por unidad de input (MJ)	Energía total MJ/ha/año
Riego aplicado	4570	m3		13040
Abono N aplicado	123	kg N	80	9840
Abono P aplicado	17.3	kg P	37	640.1
Abono K aplicado	118.9	kg K	17	2021.3
Herbicida aplicado	1.5	kg m.a.	358	537
Semilla	0.9	kg semilla	15	13.5

Operaciones	3505
Inputs	26092
Total (MJ/ha/año)	29597

10. Referencias

Anónimo. El cultivo del puerro. <http://www.infoagro.com/hortalizas/puerro.htm> [access 5 Mayo 2014]

Villalobos, F.J y Fereres E. 2017. Fitotecnia: Principios de Agronomía para una agricultura sostenible. Mundi Prensa.