



SADER

SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y DESARROLLO RURAL



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, agrícolas y Pecuarias

Uso de sensores de humedad portátiles como apoyo al manejo integral del riego

M.C. Ernesto Sifuentes Ibarra

eblnat68@gmail.com



12 de diciembre de 2019



Contenido

- 1. *Introducción***
- 2. *Problemática a atender***
- 3. *¿Porqué es importante medir la humedad del suelo?***
- 4. *Descripción de la tecnología***
- 5. *Calibración de sensores portátiles TDR***
- 6. *Ejemplos de aplicación***
- 7. *Supervisión y evaluación del riego***
- 8. *Demostración de la APP “IrriMoist 1.0”***



1. Introducción





El nuevo enfoque de la agricultura: variabilidad climática

**PROGRAMACIÓN
(TDR portátil)**

**USO EFICIENTE
DEL AGUA**

EVALUACIÓN

SUPERVISIÓN



Requerimientos hídricos de los principales cultivos en Sinaloa

Cultivo	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)		
		Gravedad	Aspersión	Goteo
Maíz	45.0	75.0	56.3	50.0
Frijol	28.0	46.7	35.0	31.1
Trigo	31.9	53.2	39.9	35.4
Garbanzo	25.4	42.3	31.8	28.2
Algodón	65.7	109.5	82.1	73.0
Cártamo	25.0	41.7	31.3	27.8
Papa	36.0	60.0	45.0	40.0
Tomate	28.8	48.0	36.0	32.0
Chile jalapeño	36.3	60.5	45.4	40.3
Calabaza	10.5	17.5	13.1	11.7
Maíz dulce	21.8	36.3	27.3	24.2
Sorgo	31.6	52.7	39.5	35.1
Soya	33.7	56.2	42.1	37.4
Caña de azúcar (planta)	150.0	250.0	187.5	166.7
Caña de azúcar (soca)	110.1	183.5	137.6	122.3
Mango	92.7	154.5	115.9	103.0

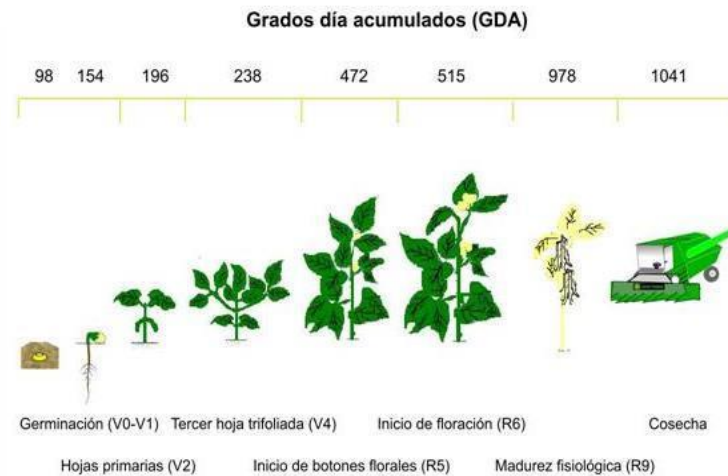
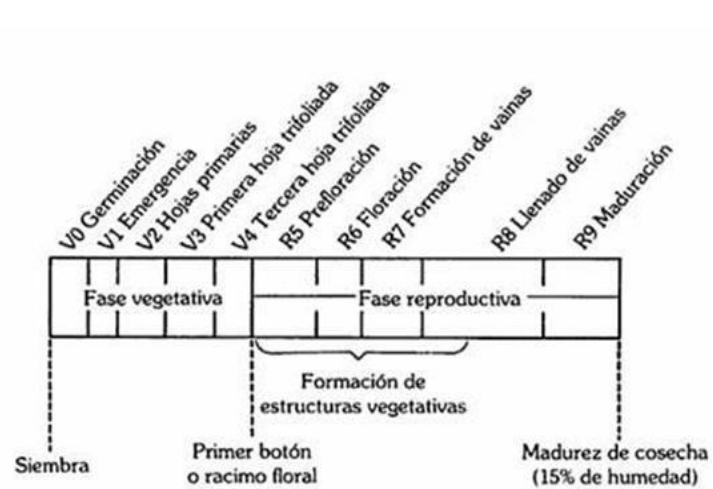
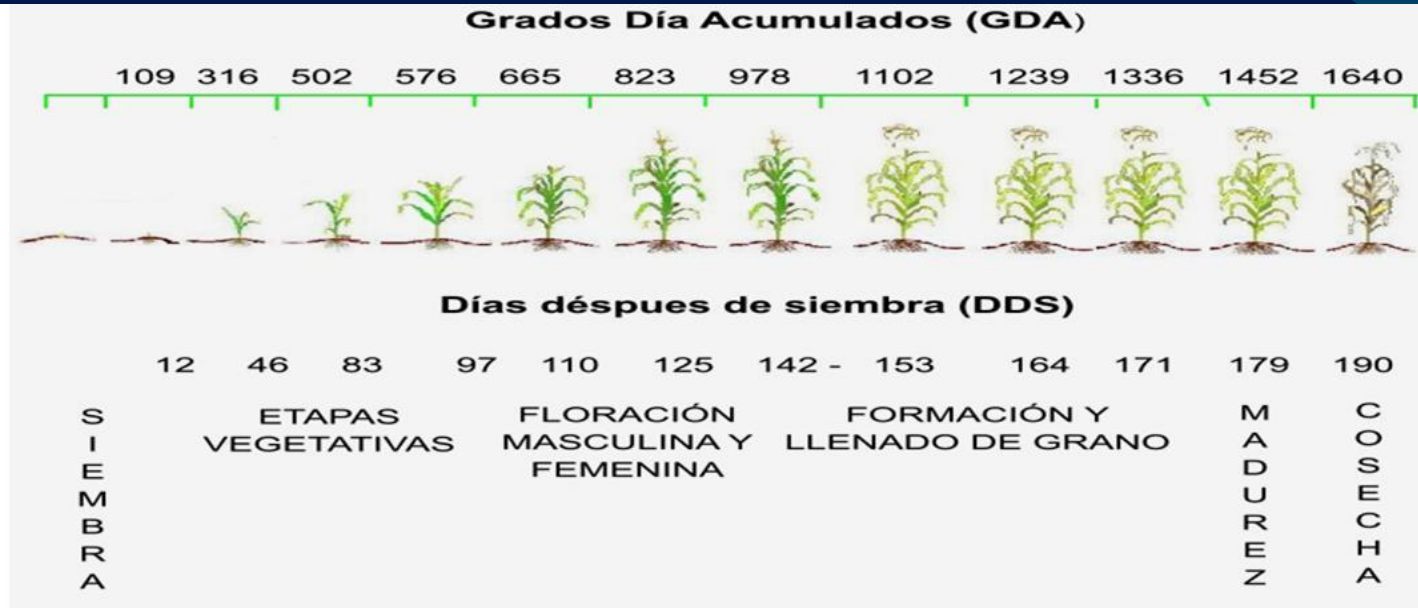
Eficiencias de aplicación consideradas: 60% gravedad, 80% aspersión y 90% goteo

$$M3/ha = Lámina \text{ en cm} \times 100$$

REQUERIMIENTOS DE RIEGO DEL MAÍZ GRAVEDAD EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA

Fecha de Siembra	Duración del ciclo (días)	ET _o (mm)	ET _r (mm)	Número de riegos
Sep-15	123	405	277	3
Oct-01	165	505	360	4
Oct-15	176	558	375	4
Nov-01	183	605	435	5
Nov-15	182	633	419	5
Dic-01	176	641	421	5
Dic-15	168	636	433	6
Ene-01	157	622	425	6
Ene-15	148	626	410	5

Nota: Incluye riego inicial, mediante modelación (IRRIMODEL) (Sifuentes *et al.*, 2013) se puede generar esta planeación para goteo





2. Problemática a atender





...Problemática

- *La mayoría de los dispositivos para medir humedad del suelo no cuentan con calibración adecuada ni en las zonas de riego existe información suficiente para su aplicación en el manejo integral de riegos.*
- *Los TDR portátil son un método rápido y preciso para el monitoreo de la humedad del suelo a diferentes profundidades.*
- *Útiles en la prevención y corrección de deficiencias y excesos de humedad.*
- *Ayudan a mejorar la eficiencia en el manejo integral del riego bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica.*
- *Ayudan al aprovechamiento de la humedad residual de lluvias en siembras tempranas.*





3. ¿Porqué es importante medir la humedad del suelo?



...Importancia del monitoreo de humedad

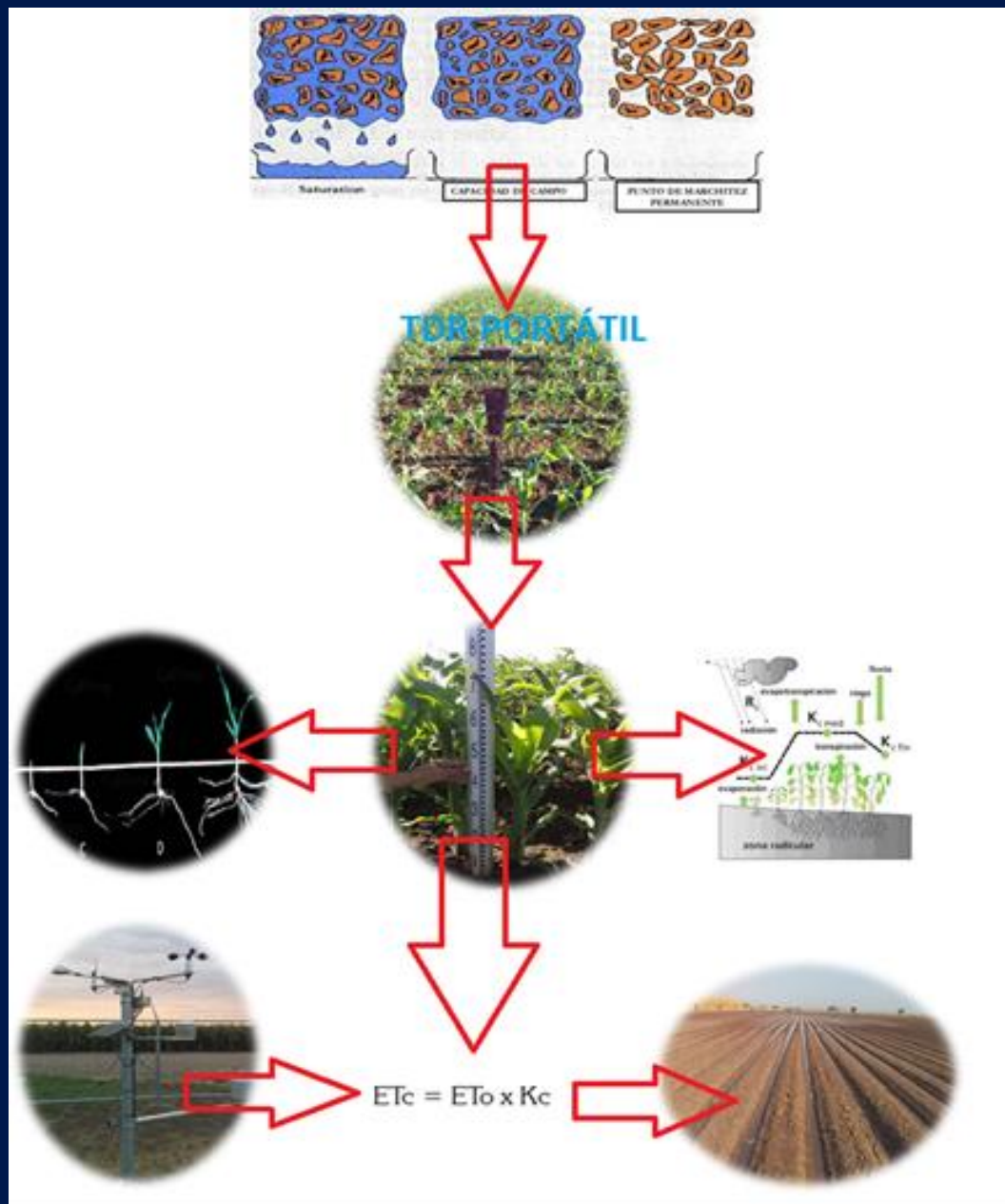
- a. Valorar y aprovechar la humedad residual por lluvias de verano para siembras tempranas en otoño-invierno.*
- b. Cálculo de láminas y volúmenes del riego inicial.*
- c. Programación precisa de láminas y momento de riegos de auxilio.*
- d. Manejo del último riego.*
- e. Reducir incidencia de enfermedades.*
- f. Priorizar solicitudes de riego por los productores en base a necesidad real.*
- g. Elaboración de planes de riego semanales.*



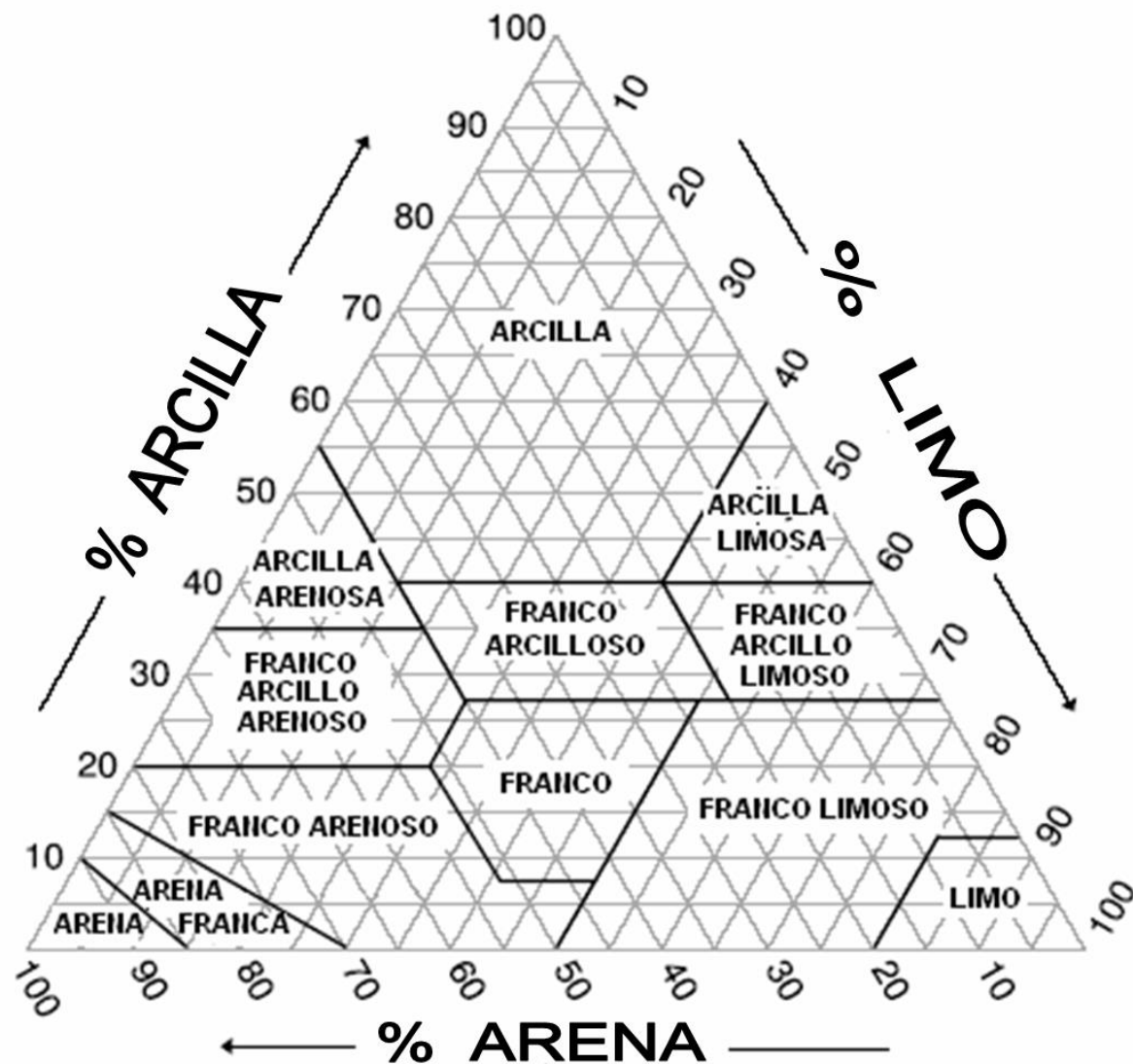
4. Descripción de la tecnología



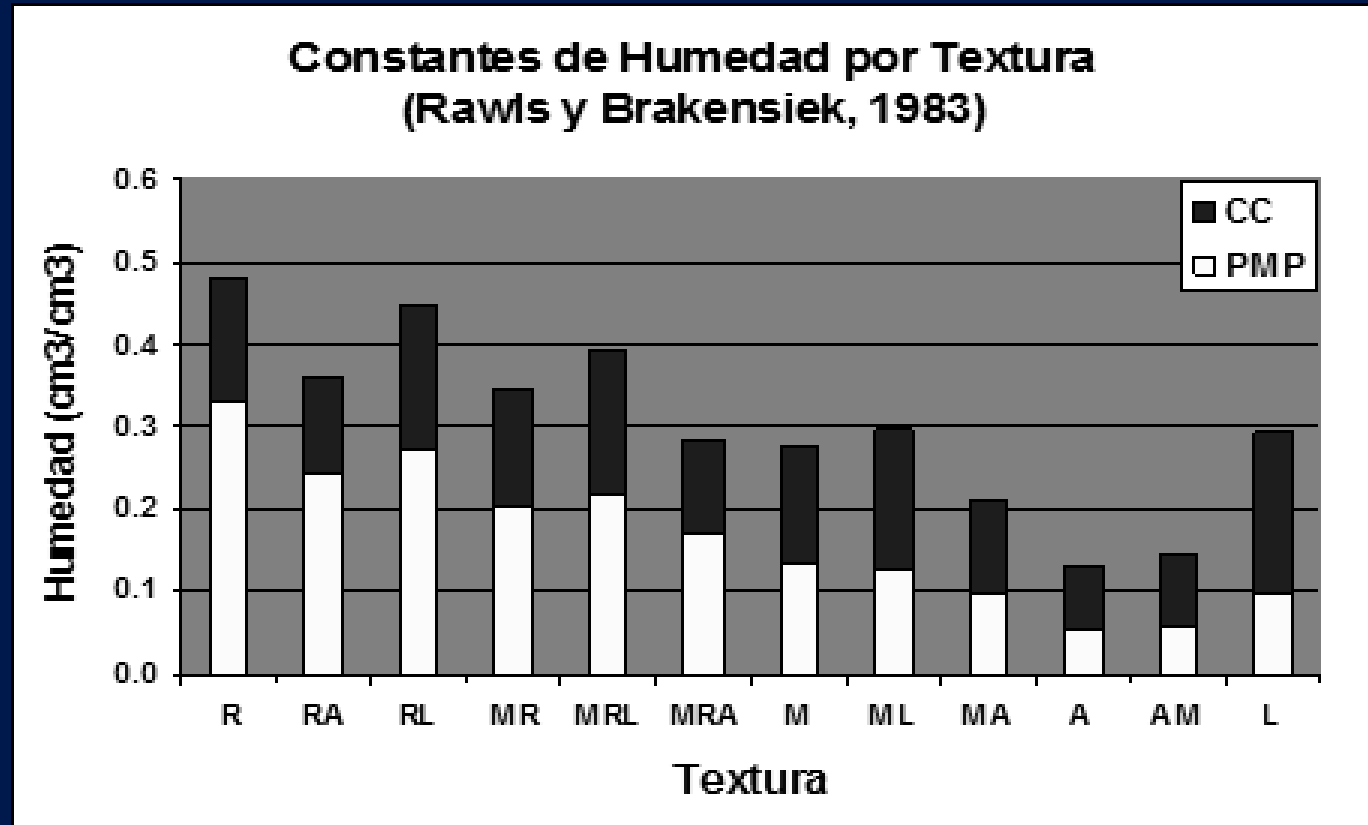
...Componentes de la tecnología



Clases texturales de suelo



1) Constantes hídricas



A=arcilla, L=limo, M=franco

DISMINUCIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACUERDO AL NIVEL DE SALES SOLUBLES O CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.

CULTIVO	DISMINUCIÓN DEL RENDIMIENTO (%)			
	0	10	25	50
Fríjol	1.0	1.5	2.3	3.6
Maíz	1.7	2.5	3.8	5.0
Cártamo	5.3	6.2	7.6	9.9
Trigo	6.0	7.4	9.5	13.0
Algodón	7.7	9.6	13.0	17.0

2) Fenología

Etapa	Fase	Clave
Vegetativa	Emergencia	VE
	Aparición de hojas verdaderas	V1...Vn
	Flor masculina o espiga	VT
Reproductiva	Flor femenina o Jilote	R1
	Grano acuoso	R2
	Grano lechoso	R3
	Grano masoso	R4
	Grano dentado	R5
	Madurez fisiológica	R6

3) Profundidad de raíz y Kc

Etapas	Clave	Prof. Radicular (cm)	Kc	CONSUMO DE AGUA PROMEDIO			DURACIÓN ETAPA	
				Diario (mm)	Etapa (mm)	Acum (mm)	GD	GDA
Emergencia	Ve	7	0.05 - 0.3	0.59	7.10	7.10	109.4	109.4
4 Hojas	V4	30	0.4 - 0.45	0.63	21.60	28.70	207.0	316.4
8 Hojas	V8	70	0.8 - 0.85	1.41	52.20	80.90	185.5	501.9
12 Hojas	V12	80	0.9 - 0.98	2.50	35.00	115.90	74.1	576.0
Flor masculina	VT	90	1 - 1.12	3.03	39.30	155.20	89.1	665.1
Jiloteo	R1	100	1.15 - 1.25	4.47	67.00	222.20	158.3	823.4
Grano acuoso	R2	100	1.1 - 1.2	4.87	82.90	305.10	155.1	978.5
Grano lechoso	R3	100	1 - 1.1	4.32	47.50	352.60	123.7	1102.2
Grano masoso	R4	100	0.8 - 1	4.34	47.80	400.40	137.5	1239.7
Grano abollado	R5	100	0.6 - 0.85	2.97	20.80	421.20	95.8	1335.5
Madurez	R6	100	0.3 - 0.4	1.85	14.80	436.00	115.6	1451.1
Cosecha	-	100	0.05 - 0.2	0.81	8.90	444.90	189.6	1640.7

4) Evapotranspiración de referencia promedio (ET_o)

- Se utilizaron las bases de datos climáticas de los últimos cinco años, generadas con la red nacional de estaciones climáticas automatizadas administradas por INIFAP.

MES	DECENA	ET _o (mm/día)	ET _o ACUM (mm)	ET _o MENSUAL (mm)
ENERO	1	3.40	33.98	103.11
	2	3.30	33.01	
	3	3.28	36.12	
FEBRERO	1	3.63	36.30	117.53
	2	4.31	43.14	
	3	4.76	38.08	
MARZO	1	4.89	48.85	167.05
	2	5.47	54.67	
	3	5.78	63.53	
ABRIL	1	5.96	59.64	184.90
	2	6.15	61.52	
	3	6.37	63.74	



5) Contenido volumétrico de humedad del suelo (H_v)

- *Para el monitoreo de esta variable se utilizan sensores de humedad TDR calibrados para los suelos de la zona, portátiles de diversas marca con extensión de 100 cm integrada, lo cual permite el monitoreo de la humedad en todo el perfil de la zona de raíces.*



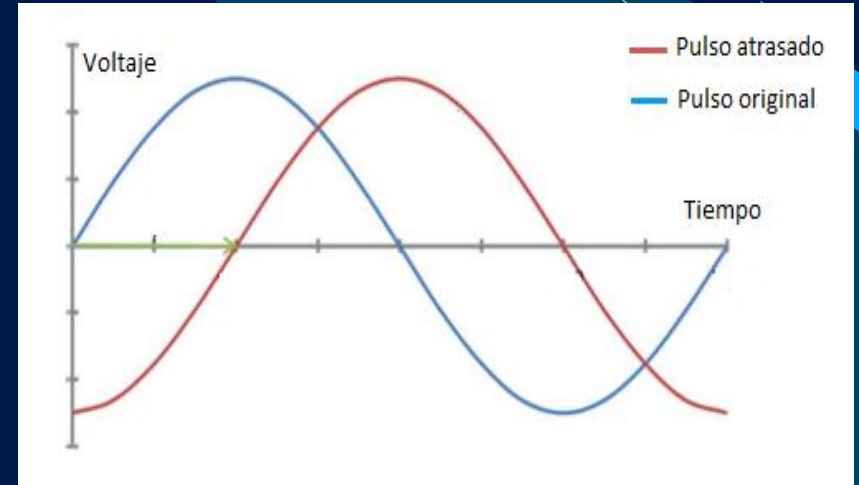


5. Calibración de sensores portátiles TDR



Principio TDR (Time Domain Reflectometry)

- Se basa en la medición del tiempo en que una onda electromagnética se desplaza a lo largo de una guía.
- El hecho que el agua ($\epsilon = 80$) tiene una constante dieléctrica mayor que la del aire ($\epsilon = 1$) o los sólidos del suelo ($\epsilon = 3-7$) se explota para determinar el contenido volumétrico de agua.
- Para su calibración se requiere conocer el tiempo de desplazamiento de la onda (mS) y el contenido de humedad determinado en forma gravimétrica.



Gravimetría

Se hace muestreo en el suelo



Se deposita las muestras en vasos de aluminio



Se pesa la muestras antes de meter en la estufa



Se mete las muestras a una estufa a 105 °C durante 24 h.



Después de 24 hrs se vuelve a pesar para determinar la humedad y se calcula con la siguiente formula.

$$\theta m = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100$$

Donde, θm es el porcentaje de humedad de un suelo (%), Psh el peso de suelo húmedo (g) y Pss el peso de suelo seco (g). Para expresarla volumétricamente se multiplica por D_a

$$H_v = H_m \times D_a$$

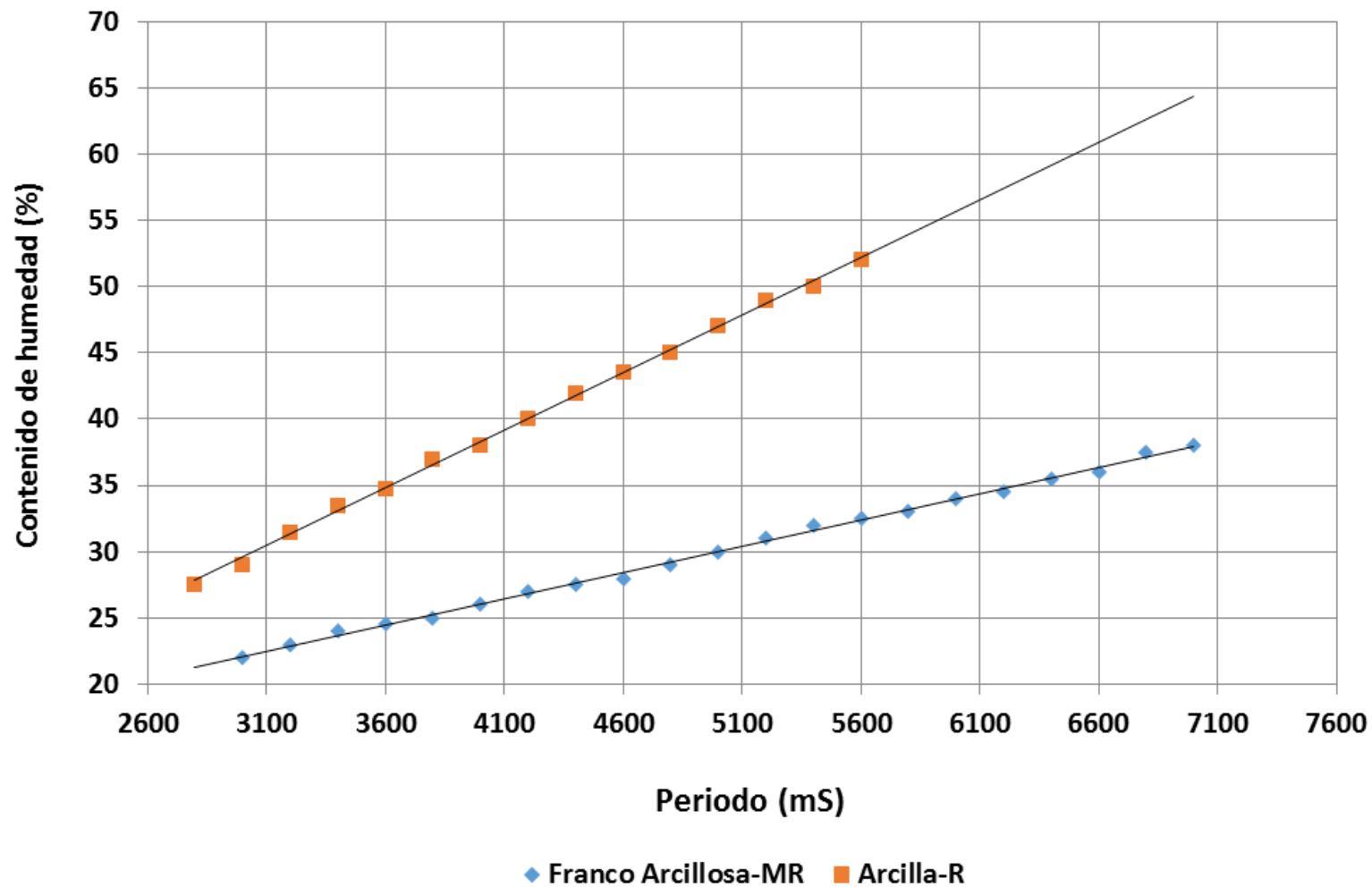
Nota: La forma H_v es la que se usa para programación de riegos, se puede expresar en % o en forma fraccionaria.

Densidad aparente (D_a)

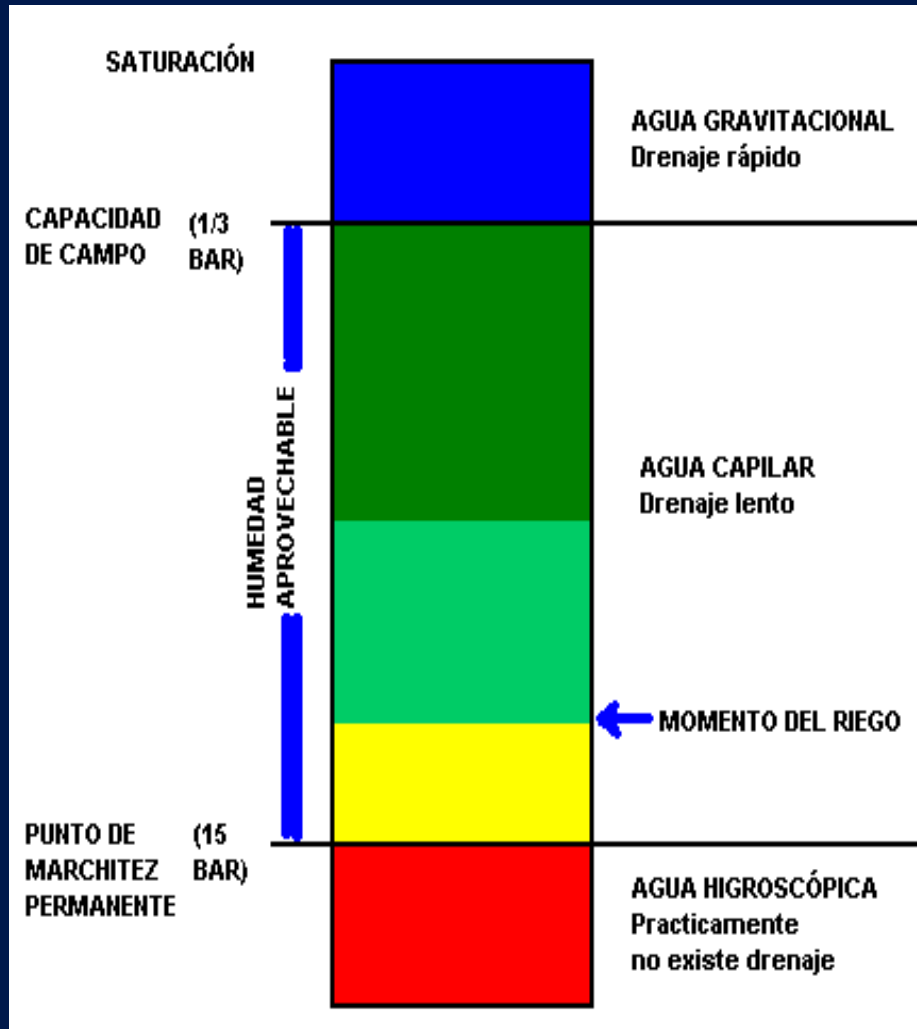
Textura	D_a (g / cm ³)
Arcillosa	1.15
Franco arcillosa	1.2
Franco	1.3
Franco arenoso	1.4
Orgánico	<1

Curvas de calibración TDR-Sinaloa

- *Spectrum TDR300*



Manejo del Riego por Goteo en Granos



- Para saber cuándo regar (MR), es necesario definir un criterio de riego (CR), que se refiere al porcentaje de la humedad aprovechable que estamos dispuestos a dejar que el cultivo extraiga.

$$MR = CC - HFA$$

$$HFA = (CC - PMP) * CR$$

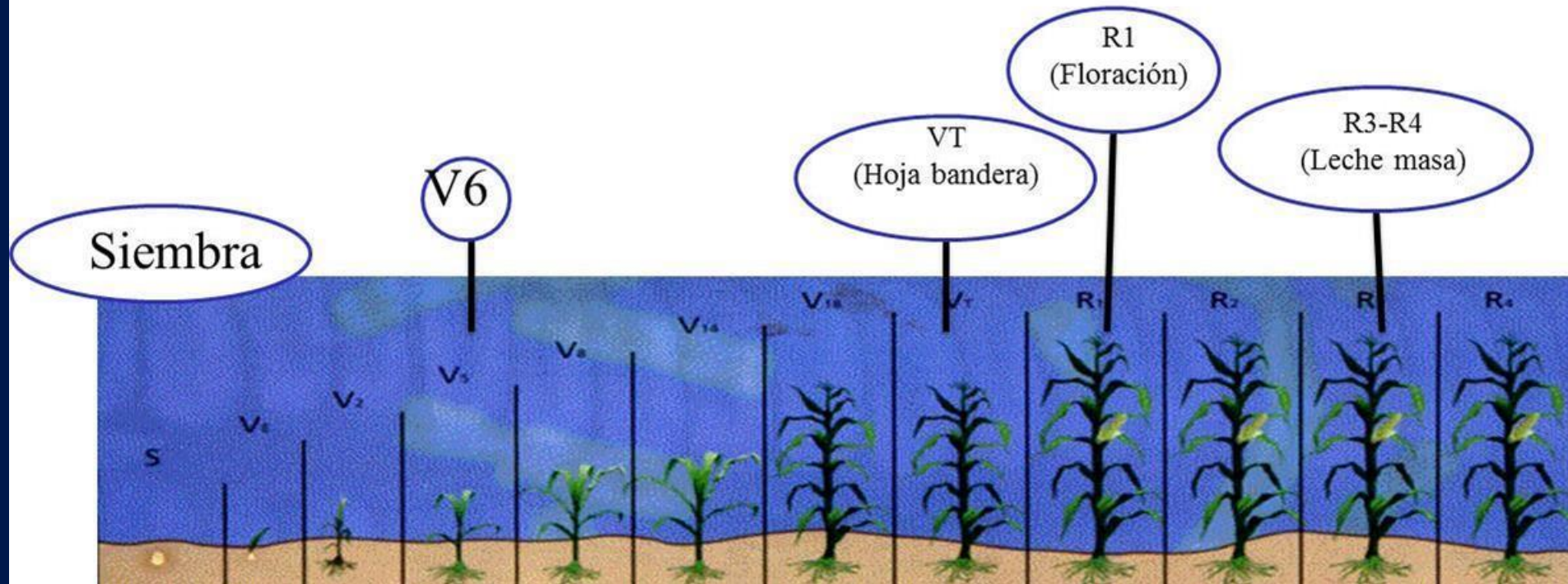
Nota: La estimación de CC y PMP se definió previamente



6. Ejemplos de aplicación



RIEGO POR ETAPAS FENOLÓGICAS



Caso 1. Programación del riego inicial

Se desea conocer la lámina y el volumen de agua que se tiene que aplicar en el riego inicial de una sección de 2.5 ha de un sistema de riego por goteo utilizando sensores de humedad tipo TDR. La textura del suelo es arcillosa (R) y el cultivo a establecer es maíz. Se quiere llevar a CC un perfil de 1 m de suelo. Los datos monitoreados por estratos en un sitio representativo fueron los siguientes:

Estrato	Espesor (cm)	Periodo	Hv	CC	Ln (cm)	Vol. Neto (m³)
1	30	38	37	48	3.3	825
2	40	40	38	48	4	1000
3	30	42	40	48	2.4	600
Total	100				9.7	2425

$$\text{Ln} = (\text{CC} - \text{Hv}) \times \text{Espesor}, \text{Vol. Neto} = \text{Ln} \times \text{Sup.} \times 100$$

$$\text{Ln} = (0.48 - 0.37) \times 30 \text{ cm} = 3.3 \text{ cm}, \text{Vol. Neto} = 3.3 \times 2.5 \text{ ha} \times 100 = 825 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Vol. Bruto} &= \text{Vol. Neto} / \text{Eficiencia} \\ 242.5 / 0.9 &= 2694 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Caso 2. Ejemplo de aplicación: programación de auxilios

Suponiendo que se tiene un suelo arcilloso (R), en una parcela de maíz bajo riego por goteo. El cultivo se encuentra en una etapa fenológica inicial y se quiere conocer el momento oportuno para aplicar el primer riego de auxilio.

De acuerdo a la etapa del cultivo y al sistema de riego, un CR adecuado de riego puede ser cuando se consuma el 30% de HA.

Constantes de humedad	Calcular la HA	Calcular la HFA	Calcular el MR
CC=48%	HA= (CC-PMP)	HFA=(HA*CR)	MR=(CC-HFA)
PMP=33%	HA= (48-33)	HFA=(15*0.3)	MR=(48-4.5)
HA=?	HA=15%	HFA=4.5%	MR=43.5%
CR=30%			

Respuesta

Por lo tanto el MR=43.5%, que es el momento del riego. Si el TDR 300, en promedio registra un mS/100 de 46 (ver Cuadro 1), corresponde a una humedad de 43.5% y el riego debe ser aplicado.

Caso 3. Dictamen de riego a nivel de predio

1. **Humedad actual (TDR):** Se determina la humedad actual (humedad volumétrica) de la parcela con la ayuda de un dispositivo TDR.
2. **Etapas actual de cultivo:** Se identifica la etapa fenológica del cultivo al momento de tomar lecturas de humedad con el TDR.
3. **Momento de riego (MR):** Se determina el criterio de riego adecuado y se usa la siguiente fórmula: $MR = CC - HFA = CC - ((CC - PMP) \times CR)$, donde CR es el criterio de riego, CC es la capacidad de campo y HFA es la humedad fácilmente aprovechable.
4. **Humedad residual:** Se realiza el cálculo de la humedad residual actual en la parcela con la siguiente fórmula: $H_{res} = (H_{act} - MR) \times Pr$; donde Hres es la humedad residual, Hact es la humedad actual y Pr la profundidad radicular.
5. **Días al riego:** Para calcular los días al próximo riego se debe conocer la ETr actual (mm/día), la cual se obtiene de multiplicar la evapotranspiración de referencia (ETo) actual por el Kc que está definido por la etapa fenológica, $E_{Tr} \text{ actual} = E_{To} \text{ actual} \times K_c$. Una vez que se obtenga la ETr se calculan los días al próximo riego como sigue: $\text{Días al riego} = H_{res} / E_{Tr} \text{ actual}$.

Ejemplo

- El 02 de abril de 2017 se inspeccionó una parcela de maíz, Textura Arcillosa, en el Módulo Batequis; se muestreó con TDR a los 30, 60 y 90 cm de profundidad. En promedio se obtuvo una humedad volumétrica actual (H_{act}) de 42%. La etapa fenológica fue V12, la que define la profundidad radicular (P_r) y el K_c de 800 mm y 0.98 respectivamente.

Solución

- El momento del riego (MR) será cuando se agote el 70% de humedad aprovechable $HA = (CC - PMP)$: $HA = (48 - 33) \times 0.7$, es decir cuando el suelo llegue a 37.5% de humedad ($37.5/100 = 0.375$)
- De acuerdo a lo anterior la humedad residual (H_{res}) es: $H_{res} = (H_{act} - MR) \times P_{raíz} = (0.42 - 0.375) \times 800 \text{ mm} = 36 \text{ mm}$.
- Con lo anterior se calculan los días al riego, para el cual se debe conocer la ET_o promedio en la fecha del muestreo de la estación más cercana, en el ejemplo corresponde a la primera decena de abril con $ET_o = 5.96 \text{ mm}$; posteriormente se calcula la evapotranspiración real del cultivo (ET_r) con la formula: $ET_r = ET_o \times K_c = 5.96 \times 0.98 = 5.84 \text{ mm/día}$.
- Los días al riego se estiman: $\text{Días al riego} = H_{res} / ET_r \text{ actual} = 36 \text{ mm} / 5.84 \text{ mm/día} = 6 \text{ días para regar}$.



7. Supervisión y evaluación del riego





Ejemplo 2: ¿Cuánto tiempo debe durar el riego?

Supóngase que se tiene un déficit de 1.2 cm de agua en el suelo y se quiere reponer la lámina total. El ancho de la sección es de 96 m con longitud de surcos de 100 m y un gasto de la bomba de 10 lps. ¿Cuánto debe durar el riego?

Solución:

Primero calculamos el área total regada que en este caso tenemos:

$$96 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 9,600 \text{ m}^2$$

Ahora usando la ecuación: $Q \times t = L \times A$ y sustituyendo en la misma:

$$0.01 \text{ (m}^3\text{/s)} \times t \text{ (horas)} = 0.012 \text{ (m)} \times 9,600 \text{ m}^2$$

Despejando t obtenemos:

$$t \text{ (horas)} = (0.012 \times 9,600) / 0.01 = 3.2 \text{ horas}$$

Para aplicar una lámina de 1.2 cm el tiempo de riego de la sección debe ser de 3.2 horas.

No olvidar la Eficiencia

Eficiencia es la habilidad del sistema para aplicar una igual cantidad de agua en todas las partes de la parcela. Un sistema con 100% de eficiencia sería capaz de aplicar la misma cantidad de agua en la cabecera, al final, a los lados etc. Ningún sistema es 100% eficiente.

Tipo de Sistema de Riego		Rango de Eficiencia (%)	
		Promedio estacional	Período Pico
Superficial	Surcos (nuevos)	55-77	77-80
	Camas (nuevas)	63-84	77-87
	Melga	70-80	70-87
	Melga nivelada de precisión	77-84	80-87
Aspersión	Movimiento lateral	70-80	70-80
	Viajero o cañón	67-75	55-70
	Puesta sólida	70-87	70-87
	Pivote central	80-87	80-87
	Movimiento lateral	84-90	84-90
Goteo	Fuente puntual	74-93	74-93
	Cintilla (tape)	85-95	85-95

* Modificado de Hoffman et al. (1990)

...Continúa ejemplo 2

Considerando el segundo ejemplo donde se determinó el tiempo de riego para aplicar una lámina de 1.2 cm. Si se asume que el sistema es 92% eficiente, entonces la cantidad por aplicar se incrementaría de 1.2 cm hasta 1.26 cm.

Para considerar la ineficiencia del sistema, la cantidad por aplicar debe dividirse entre la eficiencia. En este caso 1.2 cm se dividió entre 95% (0.95):

$$1.2 / 0.95 = 1.26$$

Esto nos da la cantidad actual de agua que necesita aplicarse para asegurar que toda la parcela reciba al menos 1.2 cm de agua. Por su puesto algunos puntos de la parcela recibirán más agua, pero esto es el costo de la ineficiencia.

Para determinar el tiempo de la tirada en el ejemplo, usamos la ecuación del regador y calculamos para 1.26 cm en lugar de 1.2 cm:

$$0.01 \times t = 0.126 \times 9,600$$

$$Q \times t = L \times A$$

Resolviendo para t tenemos:

$$t = (0.0126 \times 9,600) / 0.01 = 3.36 \text{ horas}$$



Gracias



Ernesto Sifuentes Ibarra



eblnat68@gmail.com



WEBINAR