



**VIII** Congreso Nacional y  
**I** Congreso Internacional  
de Riego, Drenaje y Biosistemas  
COMEI - UAAAN 2023 | Saltillo, Coahuila  
4 al 6 octubre 2023



# “EVALUACIÓN DE MODELOS EMPÍRICOS EN LA ESTIMACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO”

Autores:

Prado Hernández Jorge Víctor.

Muñoz Cristóbal Irouri.

Quintero Cabriales Alejandro.



Cd Saltillo, Coahuila, octubre de 2023



**AGRICULTURA**  
SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL





# INTRODUCCIÓN

Conocer el movimiento del agua en el suelo, en riego por goteo, puede ofrecer mejores bases para proyectar y planear las prácticas de riego a nivel parcelario. El conocimiento del frente húmedo es muy útil en el diseño y operación del riego, para que la aplicación sea eficiente, evitando patrones irregulares de distribución de la humedad.



Figura 1. Perfil de suelo en maíz. Fuente: InfoAgrícola.com

# INTRODUCCIÓN

Para la estimación de la evolución temporal del diámetro y profundidad del frente de avance del bulbo húmedo en riego por goteo, existen modelos matemáticos empíricos que contemplan las características del suelo y la operación del sistema de riego.

Dichos modelos fueron obtenidos con variedad de estrategias metodológicas por lo que resulta necesario evaluar sus capacidades predictivas.

## OBJETIVO PRINCIPAL

**Evaluar cinco modelos matemáticos empíricos** del comportamiento temporal del diámetro y profundidad del frente de humedecimiento, a partir de las características físicas del suelo y de las condiciones de riego, para identificar el adecuado para el diseño y operación de sistemas de riego por goteo superficial.

## OBJETIVOS SECUNDARIOS

- ✓ Obtener la evolución temporal y espacial del frente de avance del bulbo de humedecimiento en un suelo franco arenoso en riego por goteo superficial, a partir de mediciones experimentales y representaciones gráficas.
- ✓ Delimitar el efecto del caudal del emisor, el tiempo de riego y el contenido de humedad inicial del suelo sobre la evolución de la geometría del frente de humedecimiento.



# REVISIÓN DE LITERATURA: MODELO EMPÍRICOS

Modelo de Amin & Ekhmaj (2006):

$$d = 12.544\Delta\theta^{-0.5626}V^{0.2686}q^{-0.0028}K_s^{-0.0344}$$

$$z = 6.194\Delta\theta^{-0.383}V^{0.365}q^{-0.101}K_s^{0.195}$$

Modelo de Malek & Peters (2011):

$$d = q^{0.543}K_s^{0.772}t^{0.419}\Delta\theta^{-0.687}P_b^{0.305}$$

$$z = q^{0.398}K_s^{0.208}t^{0.476}\Delta\theta^{-1.253}P_b^{0.445}$$

Modelo de Al-Ogaidi et al. (2015):

$$d = 40.489q^{0.2717}t^{0.2562}K_s^{-0.2435}\theta_i^{0.1122}P_b^{2.0770}S^{-0.1082}Si^{0.0852}C^{-0.1540}$$

$$z = 2.266q^{0.3249}t^{0.3902}K_s^{0.0010}\theta_i^{0.0520}P_b^{6.1919}S^{-0.0928}Si^{0.2574}C^{-0.2162}$$

Modelo de Cruz-Bautista et al. (2016):

$$d = 9.985V^{0.353}K_s^{-0.110}\theta_i^{-0.387}$$

$$z = 331.524V^{0.458}q^{-0.152}\theta_i^{0.386}\theta_r^{0.349}Si^{-0.421}$$

Modelo de Prado-Hernández et al. (2017):

$$d = 35.426q^{0.0418}K_s^{-0.0179}t^{0.3216}\Delta\theta^{-0.0232}P_b^{-0.1535}MO^0$$

$$z = 10.7989q^{0.6030}K_s^{-0.0277}t^{0.3378}\Delta\theta^{-0.0109}P_b^{-0.0770}MO^0$$

# REVISIÓN LITERATURA

Cuadro 1. Fronteras de validez de los modelos. Fuente: Cristóbal et al, 2022.  
 NE: Valores no especificados.

Modelo	Textura del suelo	$q$ ( $l\ h^{-1}$ )	$K_s$ ( $cm\ h^{-1}$ )	$\theta_s$ ( $cm^3\ cm^{-3}$ )	$P_b$ ( $g\ cm^{-3}$ )	$\theta_i$ ( $cm^3\ cm^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $cm^3\ cm^{-3}$ )	MO (%)
Schwartzman & Zur (1986)	Limoso y Franco arenoso.	4.16 - 20.06	0.84 - 8.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Amin & Ekhmaj (2006)	Limoso, Franco, Arenoso y Franco arcilloso.	0.60 - 12.30	0.85 - 5.80	0.45 - 0.58	1.28 - 1.46	0.03 - 0.27	N.E.	N.E.
Malek & Peters (2011)	Franco arcilloso.	2.00 - 6.00	3.66	N.E.	1.48	0.22	N.E.	N.E.
Al-Ogaidi et al. (2015)	Arenoso, Limoso, Franco y Franco arcilloso.	0.50 - 12.30	0.85 - 5.80	0.42 - 0.58	1.28 - 1.46	0.03 - 0.27	N.E.	N.E.
Cruz-Bautista et al. (2016)	Franco arenoso, Franco arcilloso y Franco limoso.	2.00 - 8.00	2.05 - 3.28	0.39 - 0.51	1.18 - 1.51	0.05 - 0.11	0.04 - 0.08	N.E.
Prado-Hernández et al. (2017)	Franco arcilloso y arenoso	3.00 - 4.00	11.40 - 44.40	N.E.	1.12 - 1.52	N.E.	N.E.	1.75 - 2.82

## MATERIALES Y MÉTODOS

1. Estructura del cubo de acrílico
  - Placas de acrílico
  - Soportes aluminio
  - Polines de soporte
  - Sistema de drenaje



**Figura 2. Cubo de acrílico en laboratorio**

# MATERIALES Y MÉTODOS

2. Sistema de riego. Verificación a 0.56 BAR y aforo de goteros.

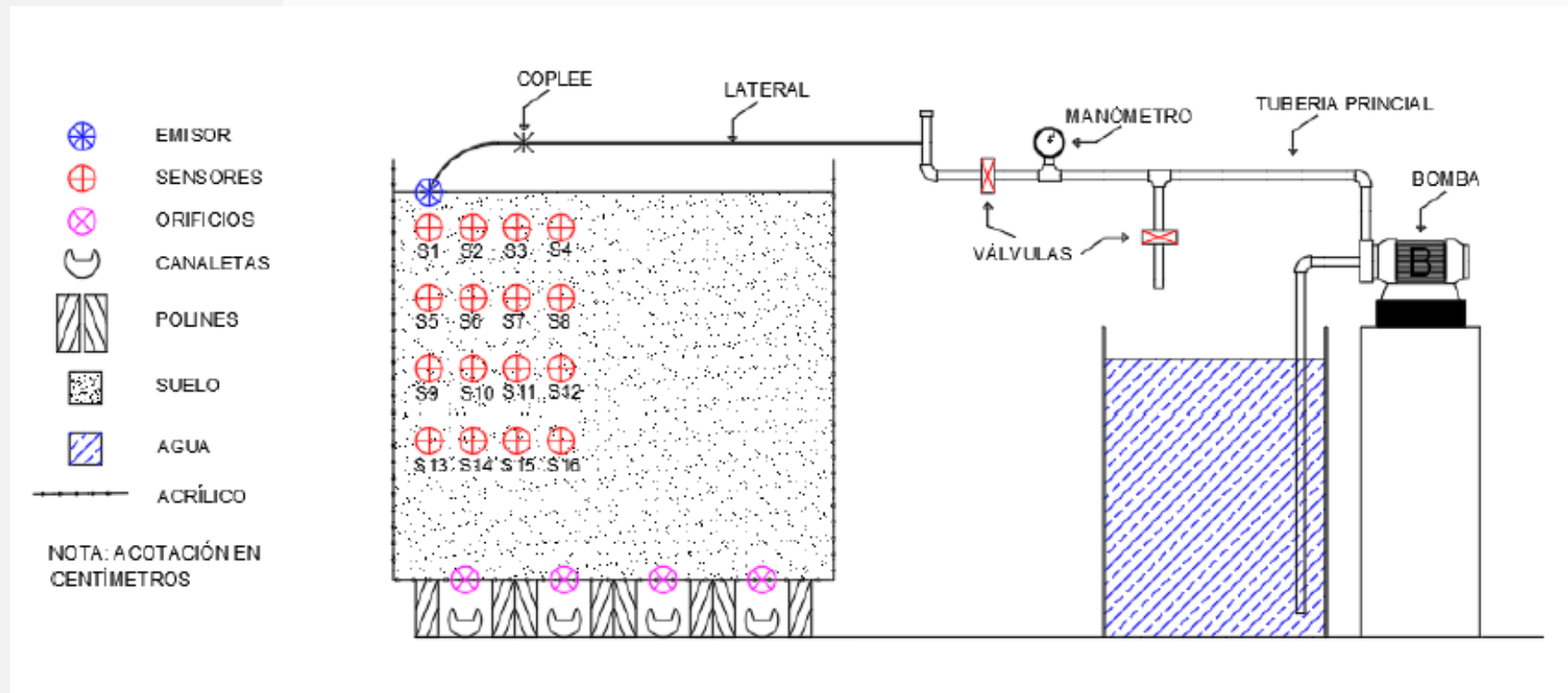


Figura 3. Vista lateral sistema de riego y cubo de prueba.



## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3. Calibración de sensores inteligentes de humedad modelo S-SMC-M005



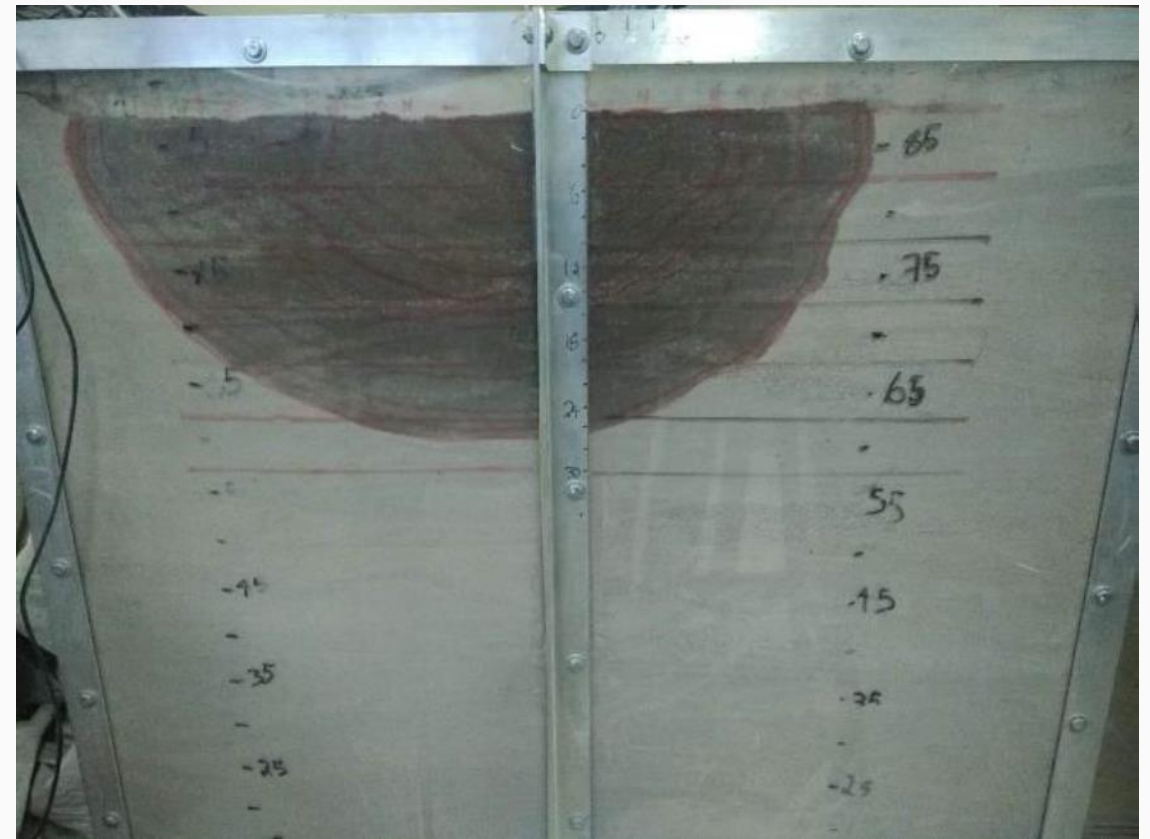
**Figura 4. Sensor de humedad HOBO.**

**Cuadro 2. Valores permisibles en la verificación de los sensores de humedad del suelo.**

Sensor	Aire	Agua
S-SMC-M005	-0.26 a -0.13	0.47 a 0.57

## MATERIALES Y MÉTODOS

4. Muestreo y preparación del suelo
  - Obtener suelo de campo (quitando materia orgánica).
  - Secado en invernadero.
  - Triturado con apisonador de madera.
  - Tamizado por criba de 6mm.
  - Se agregó arena (2cubetas de suelo, por 1 de arena).
  - Llenado del cubo a densidad 1.4 g cm<sup>-3</sup>.



**Figura 5. Vista de perfil cubo de acrílico**

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 5. Caracterización del suelo

- Hidrómetro de bouyucos para textura
- Terrón y parafina para densidad aparente
- Walkley y black para MO
- Olla de presión para contenido de humedad gravimétrico a capacidad de campo
- Membrana de presión para contenido de humedad gravimétrico a PMP.
- Permeámetro para la conductividad hidráulica a saturación.



# MATERIALES Y MÉTODOS

6. Llenado e instalación de sensores.

-  EMISOR
-  SENSORES
-  ORIFICIOS
-  CANALETAS
-  POLINES
-  SUELO
-  ACRÍLICO

NOTA: ACOTACIÓN EN CENTÍMETROS

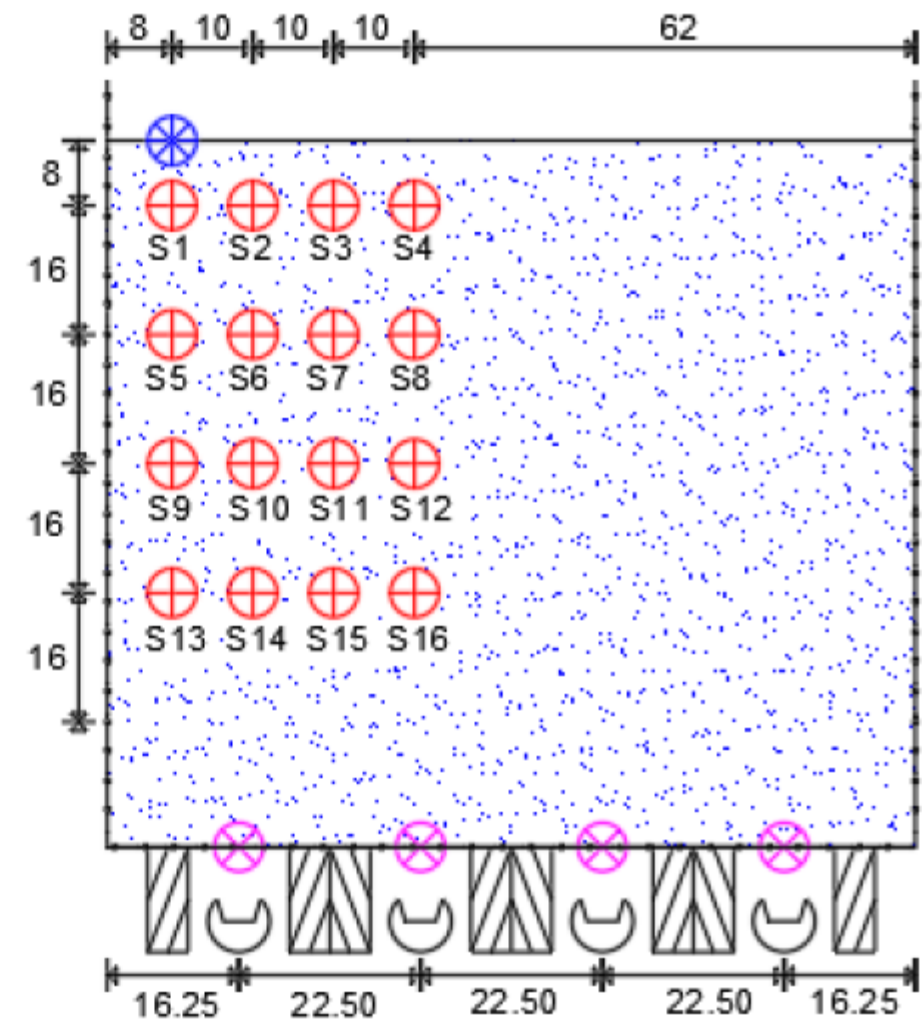


Figura 6. Vista lateral de cubo y acomodo de sensores

# MATERIALES Y MÉTODOS

## 7. Pruebas de riego



**Figura 7.** Nivelación de suelo



**Figura 8.** Inicio de riego



**Figura 9.** Proceso del riego



# MATERIALES Y MÉTODOS

## 7. Pruebas de riego



**Figura 10.** Vista frontal de la evolución del bulbo húmedo



**Figura 11.** Formación del bulbo húmedo



# MATERIALES Y MÉTODOS

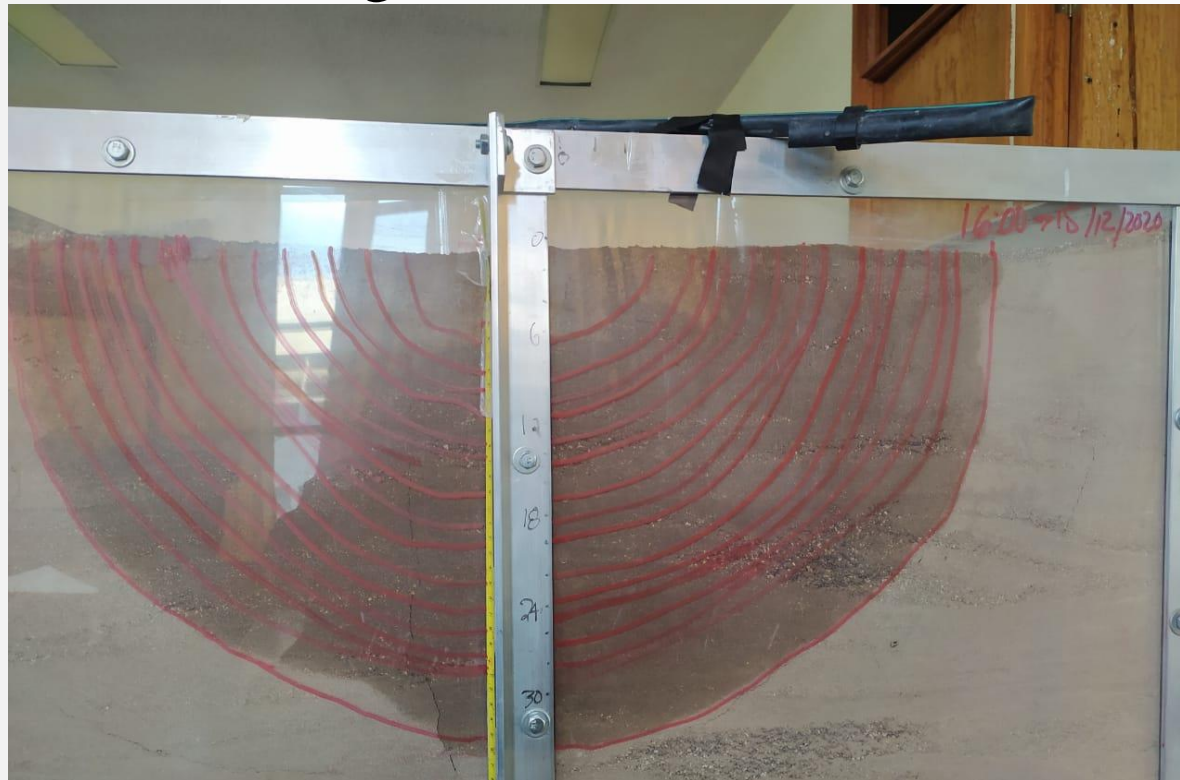
## 7. Pruebas de riego

**Cuadro 3.** Información general de los seis riegos

Número de Riego	Caudal (L h <sup>-1</sup> )	Tiempo de Riego (h)	$\theta_i$ promedio (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Número de lecturas en d y z
1	2.92	6.50	0.082	12
2	2.92	5.00	0.215	13
3	1.58	6.00	0.118	11
4	1.58	5.00	0.240	13
5	7.48	3.00	0.217	13
6	7.48	1.00	0.244	10

# MATERIALES Y MÉTODOS

## 8. Registro y generación de la geometría del frente húmedo



**Figura 12.** Registro de la evolución del bulbo húmedo a través del tiempo (cada línea roja es una medición).

# RESULTADOS

1. Análisis de cada riego, presentando cuadros y gráficas de los diámetros y profundidades medidas directamente en el bulbo húmedo en distintos intervalos de tiempo.
2. La evaluación del desempeño de los modelos se presenta en dos partes, la primera analiza el diámetro y la segunda la profundidad del bulbo húmedo en los seis riegos.

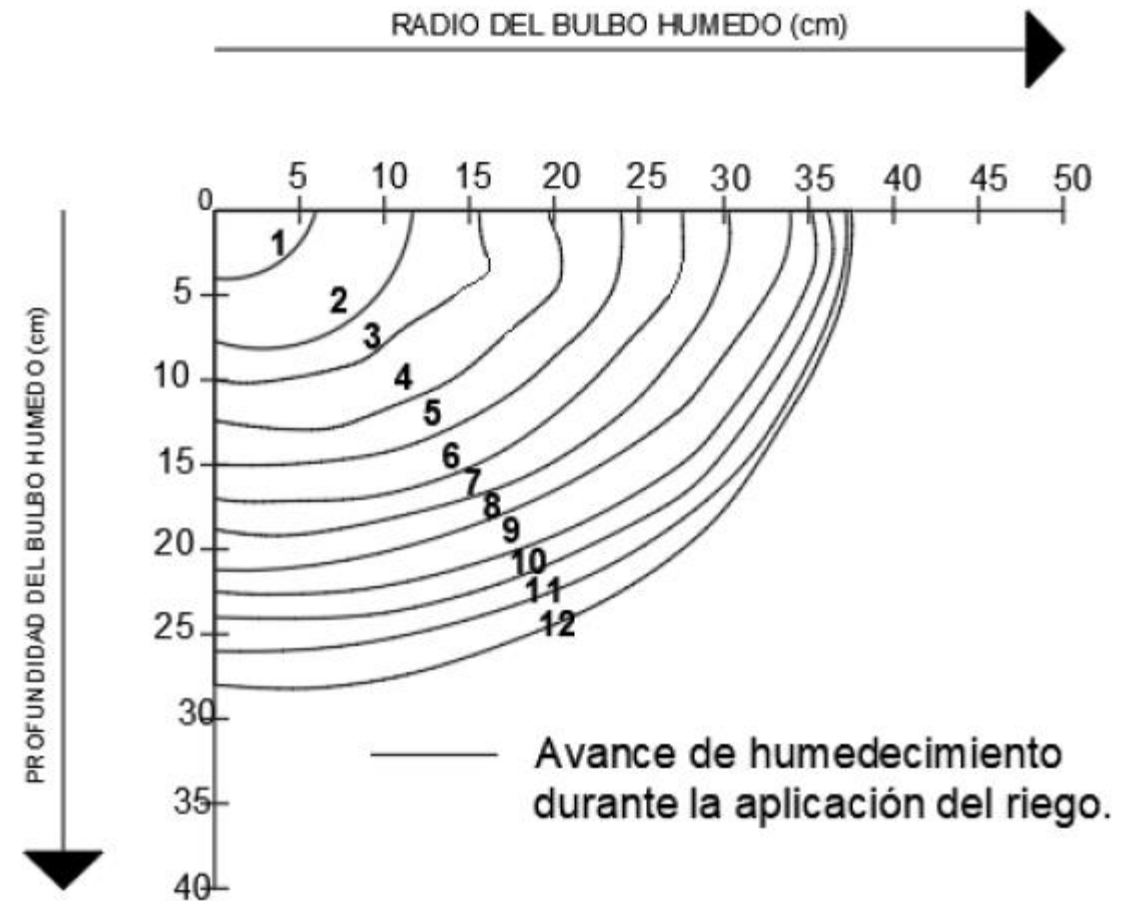




# 7. RESULTADOS

Número de medición	Tiempo (H:M:S)	d (cm)	z (cm)
0	0:00:00	0.00	0.00
1	0:20:00	11.94	4.00
2	0:45:00	23.32	7.70
3	1:00:00	31.12	10.00
4	1:20:00	39.36	12.40
5	2:00:00	47.86	15.00
6	2:20:00	55.10	17.00
7	2:50:00	60.48	18.80
8	3:20:00	67.82	21.20
9	3:50:00	70.32	22.50
10	4:20:00	72.20	24.00
11	5:00:00	74.36	26.00
12	6:30:00	74.96	28.00

**RIEGO 1.**  
**Q=2.92l<sup>h</sup>-1**  
**Θ<sub>i</sub>=0.082**  
**cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>**





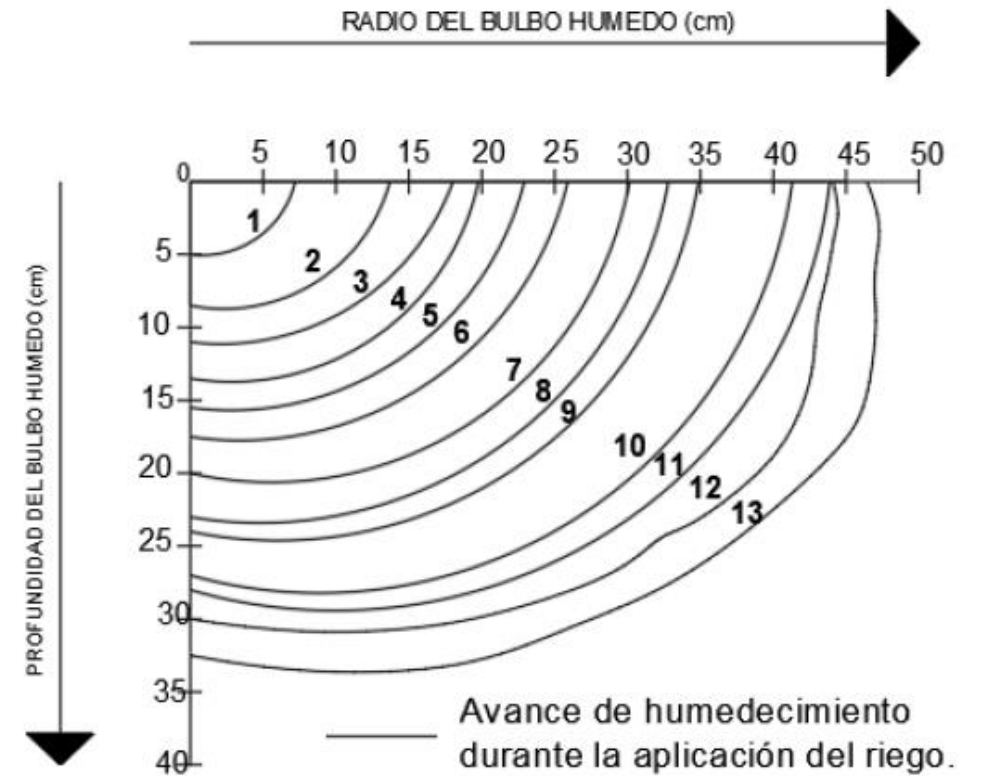
# 7. RESULTADOS

Número de medición	Tiempo (H:M:S)	d (cm)	z (cm)
0	0:00:00	0.00	0.00
1	0:10:00	14.38	5.00
2	0:20:00	27.38	8.50
3	0:30:00	36.04	11.00
4	0:40:00	39.52	13.50
5	1:00:00	45.84	15.50
6	1:15:00	51.80	17.50
7	1:30:00	60.24	20.00
8	2:20:00	65.60	23.00
9	2:45:00	69.72	24.00
10	3:10:00	82.62	27.00
11	3:40:00	87.74	28.00
12	4:30:00	88.18	30.00
13	5:00:00	92.82	32.50

**RIEGO 2.**

**$Q=2.92\text{lh}^{-1}$**

**$\Theta_i=0.215$   
 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$**





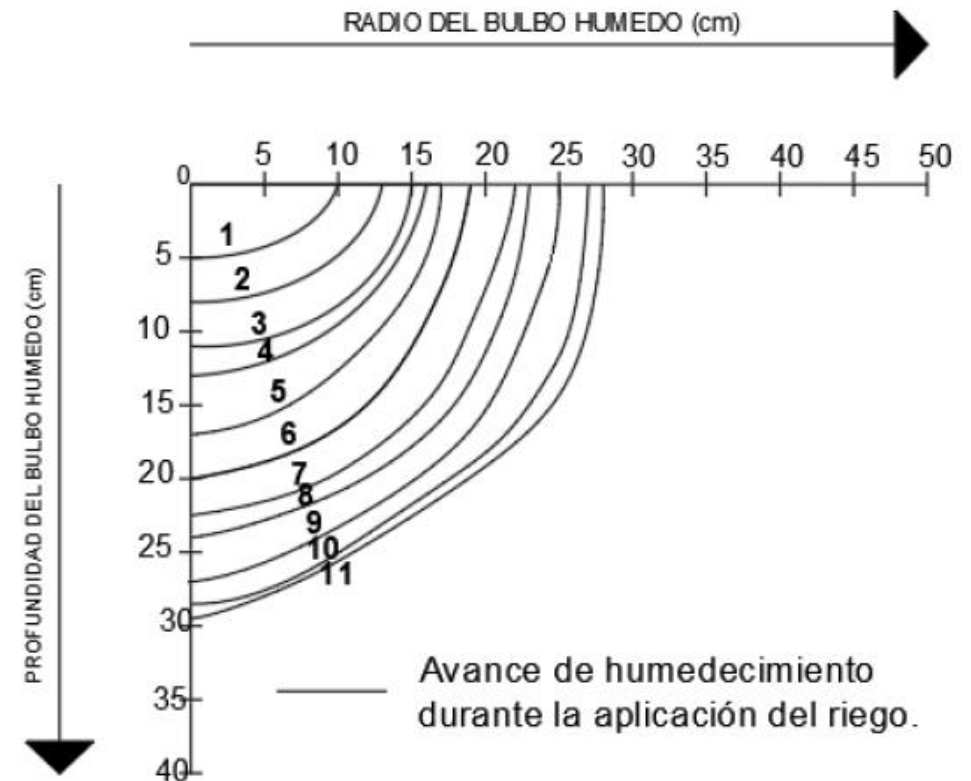
# 7. RESULTADOS

Número de medición	Tiempo (H:M:S)	d (cm)	z (cm)
0	0:00:00	0.00	0.00
1	0:15:00	20.00	5.00
2	0:30:00	26.00	8.00
3	0:45:00	30.00	11.00
4	1:00:00	32.00	13.00
5	1:45:00	34.00	17.00
6	2:15:00	38.00	20.00
7	3:00:00	44.00	22.50
8	3:30:00	46.00	24.00
9	4:30:00	50.00	27.00
10	5:30:00	54.00	28.50
11	6:00:00	56.00	29.50

**RIEGO 3.**

**$Q=1.58 \text{ lh}^{-1}$**

**$\Theta_i=0.118$   
 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$**







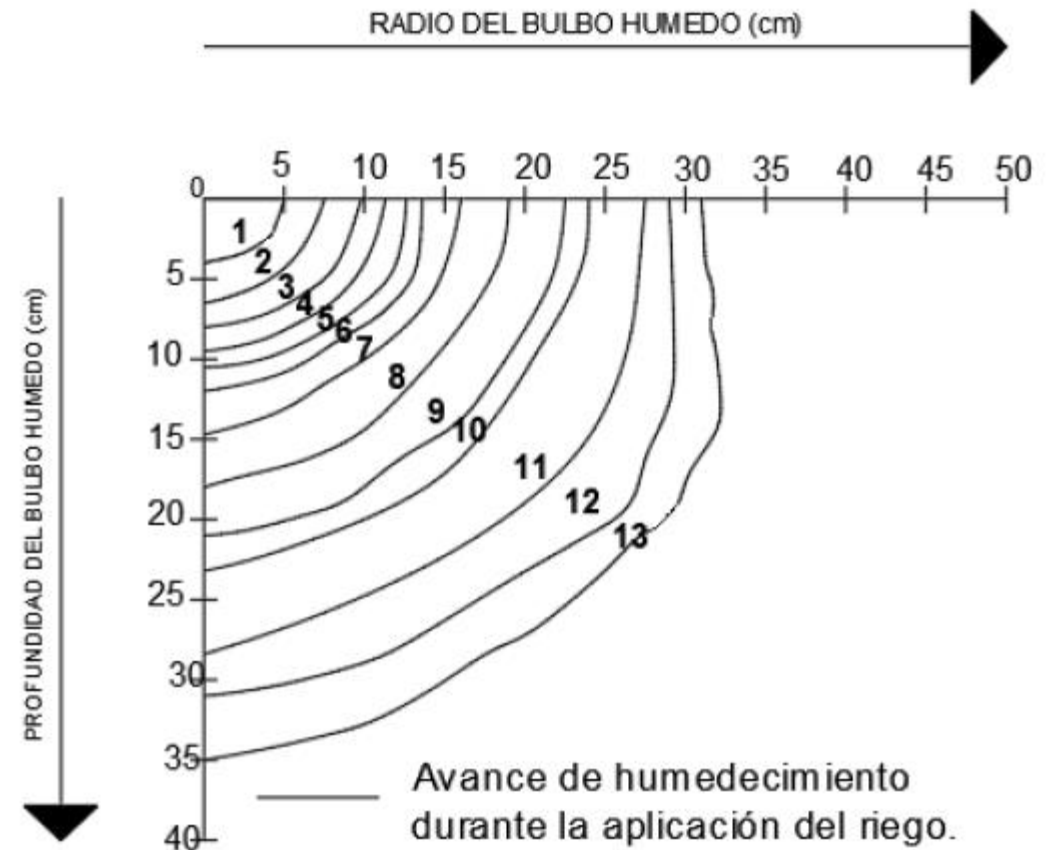
# 7. RESULTADOS

Número de medición	Tiempo (H:M:S)	d (cm)	z (cm)
0	0:00:00	0.00	0.00
1	0:05:00	10.00	4.00
2	0:10:00	15.00	6.50
3	0:15:00	19.60	8.00
4	0:20:00	22.60	9.50
5	0:25:00	25.20	10.50
6	0:30:00	27.20	12.00
7	0:40:00	32.00	14.70
8	1:00:00	38.00	18.00
9	1:30:00	45.00	21.00
10	2:00:00	48.00	23.20
11	3:00:00	55.00	28.40
12	4:00:00	58.00	31.00
13	5:00:00	62.00	35.00

**RIEGO 4.**

**$Q=1.58 \text{ lh}^{-1}$**

**$\Theta_i=0.240$   
 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$**

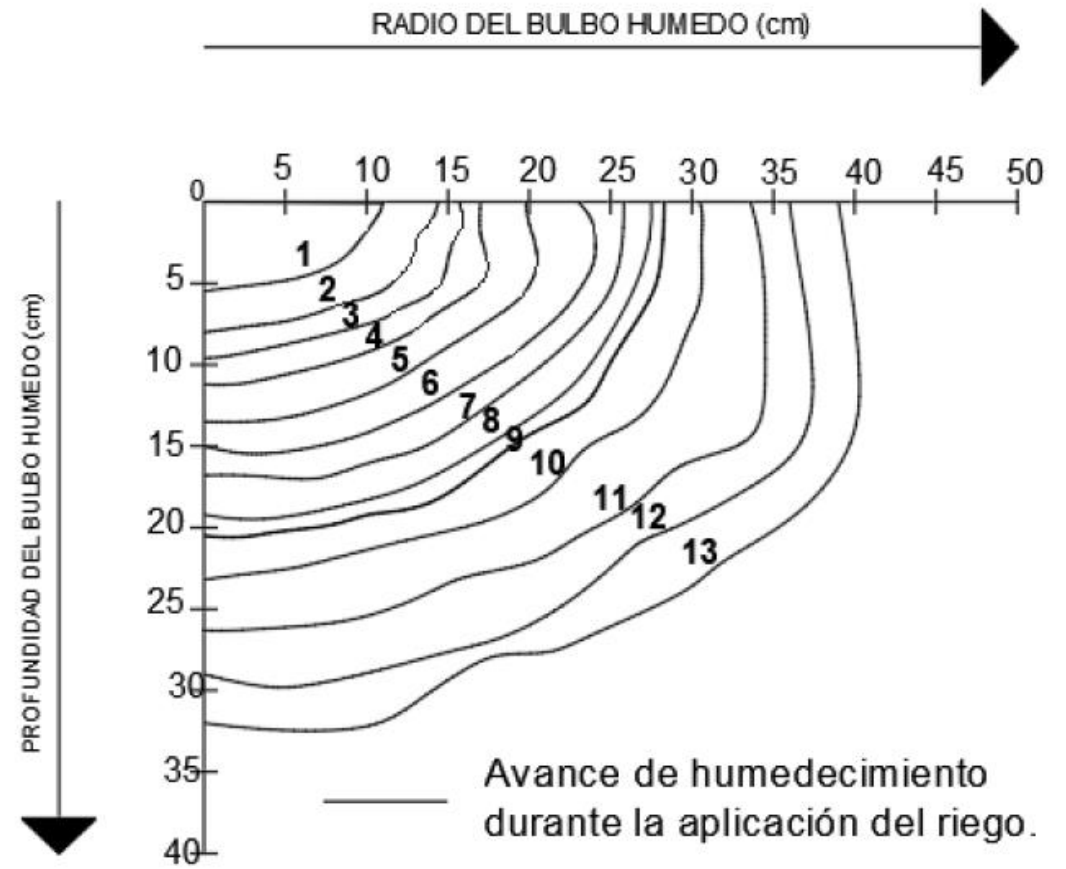




# 7. RESULTADOS

**RIEGO 5.**  
**Q=7.48 lh-1**  
 **$\Theta_i=0.217$**   
**cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>**

Número de medición	Tiempo (H:M:S)	d (cm)	z (cm)
0	0:00:00	0.00	0.00
1	0:05:00	22.00	5.50
2	0:10:00	28.80	8.00
3	0:15:00	31.40	9.60
4	0:20:00	34.00	11.20
5	0:30:00	39.60	13.50
6	0:40:00	46.00	15.00
7	0:50:00	51.60	16.80
8	1:00:00	55.00	19.20
9	1:10:00	56.60	20.50
10	1:30:00	61.00	23.20
11	2:00:00	67.20	26.30
12	2:30:00	72.00	29.00
13	3:00:00	78.00	32.00





# 7. RESULTADOS

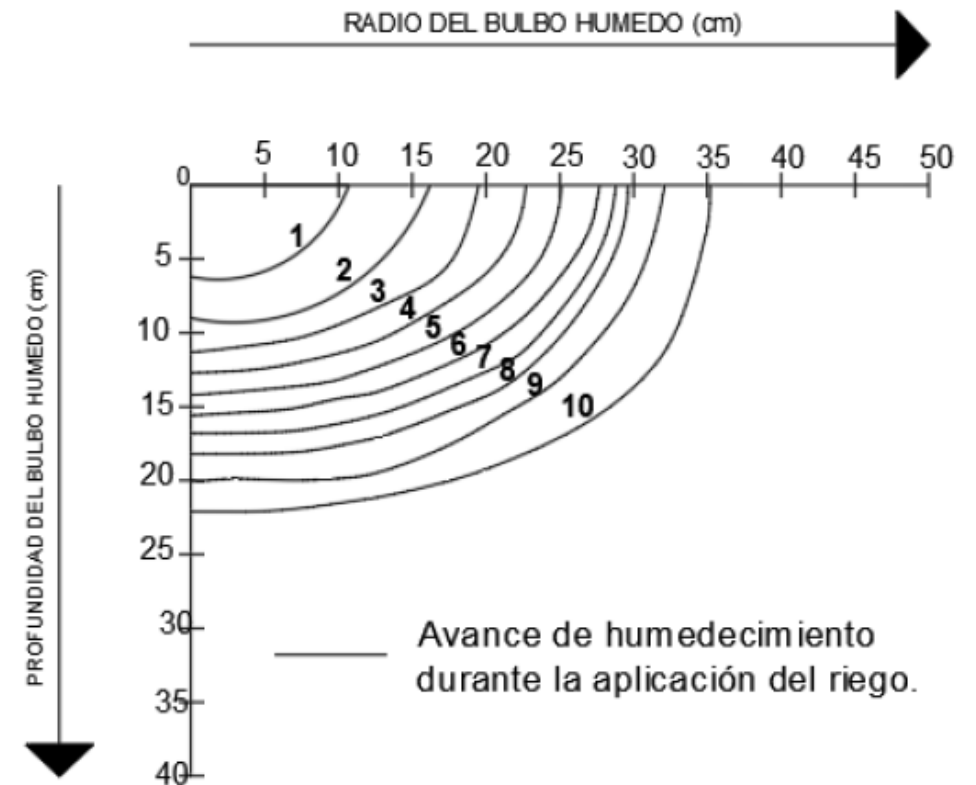
**RIEGO 6.**

**$Q=7.48 \text{ lh}^{-1}$**

**$\Theta_i=0.244$**

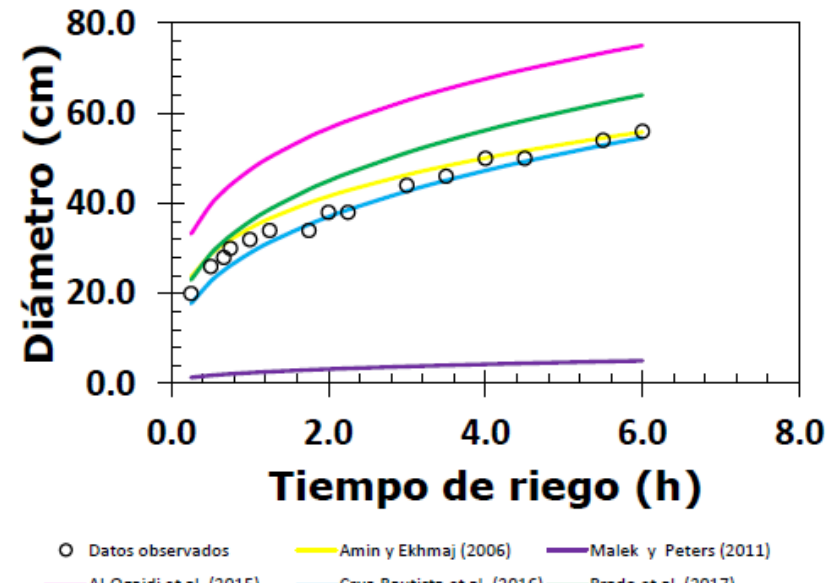
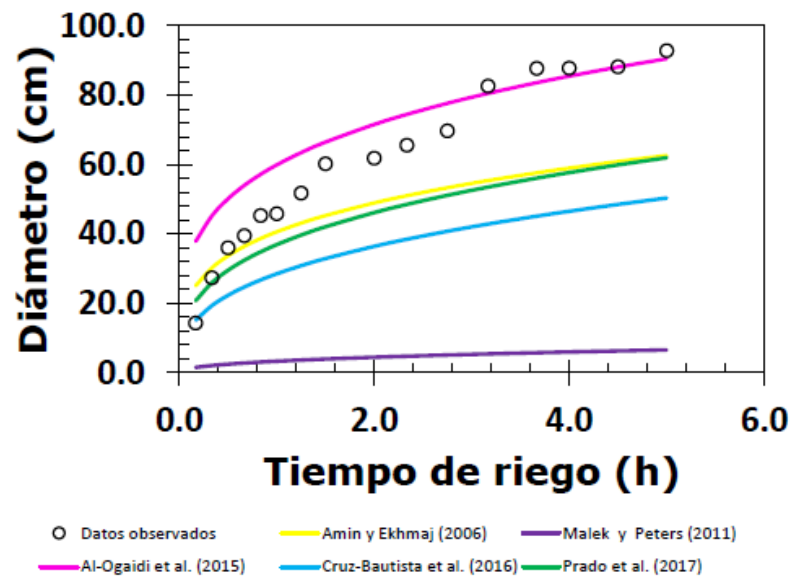
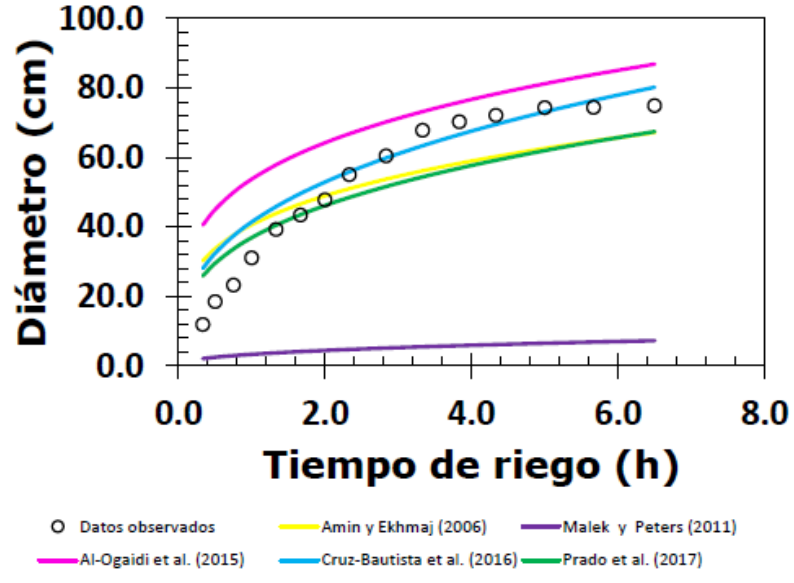
**$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$**

Número de medición	Tiempo (H:M:S)	d (cm)	z (cm)
0	0:00:00	0.00	0.00
1	0:05:00	21.40	6.20
2	0:10:00	32.40	9.00
3	0:15:00	39.00	11.30
4	0:20:00	45.40	12.70
5	0:25:00	50.20	14.20
6	0:30:00	55.40	15.60
7	0:35:00	57.60	16.80
8	0:40:00	59.20	18.20
9	0:50:00	64.20	20.00
10	1:00:00	70.40	22.10





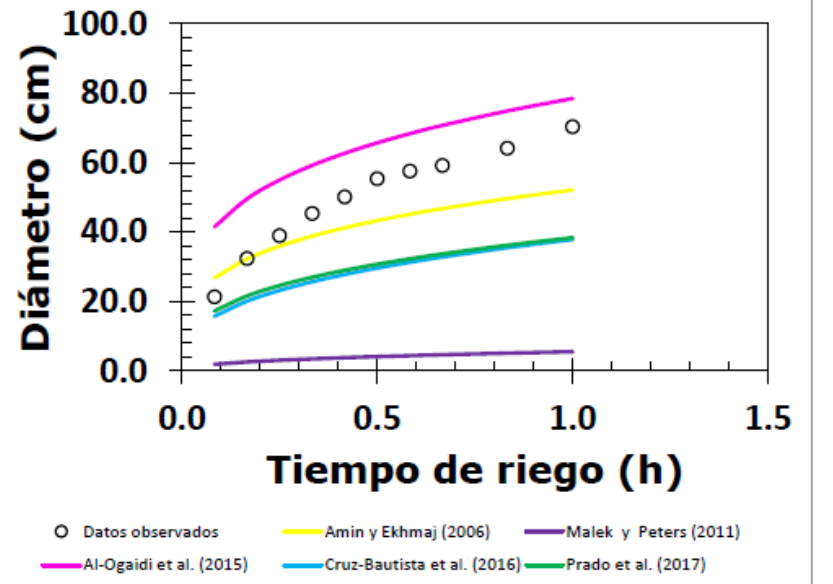
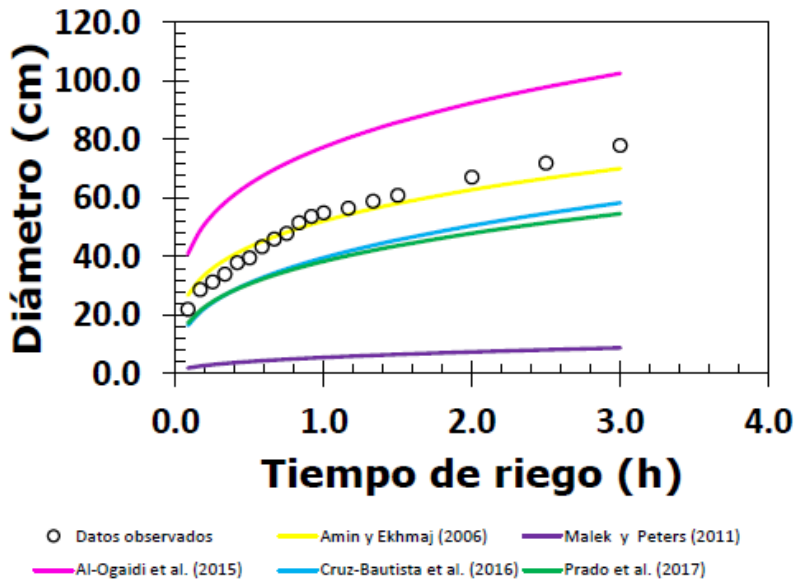
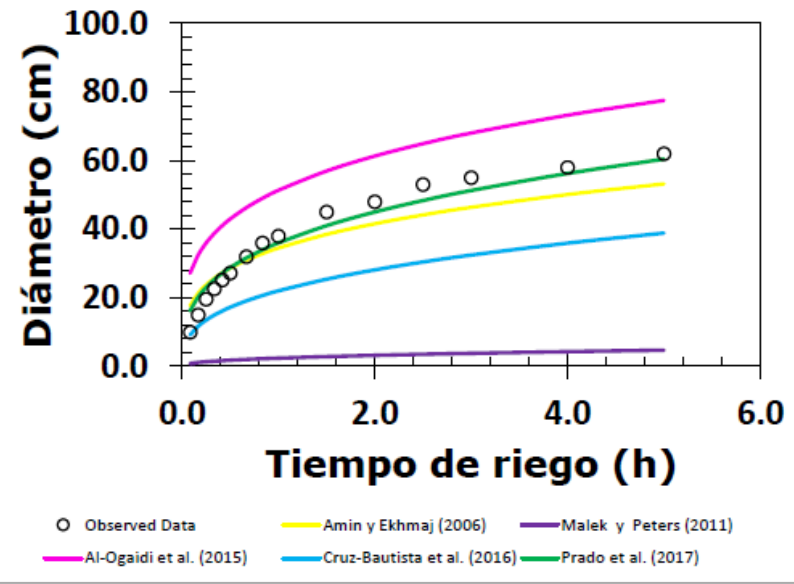
# ANÁLISIS DE MODELOS EN DIÁMETRO



**Riego 1.  $q= 2.92$  lph**

**Riego 2.  $q= 2.92$  lph**

**Riego 3.  $q= 1.58$  lph**



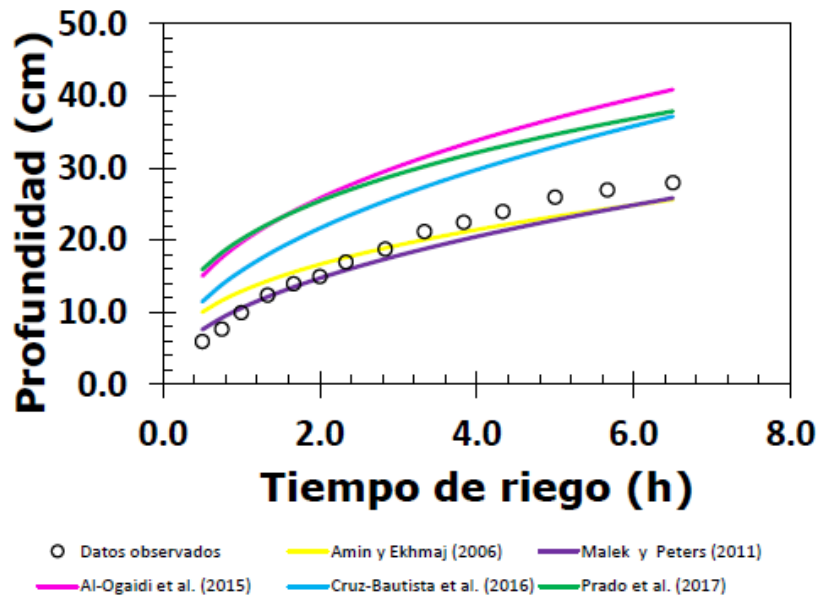
**Riego 4.  $q= 1.58$  lph**

**Riego 5.  $q= 7.48$  lph**

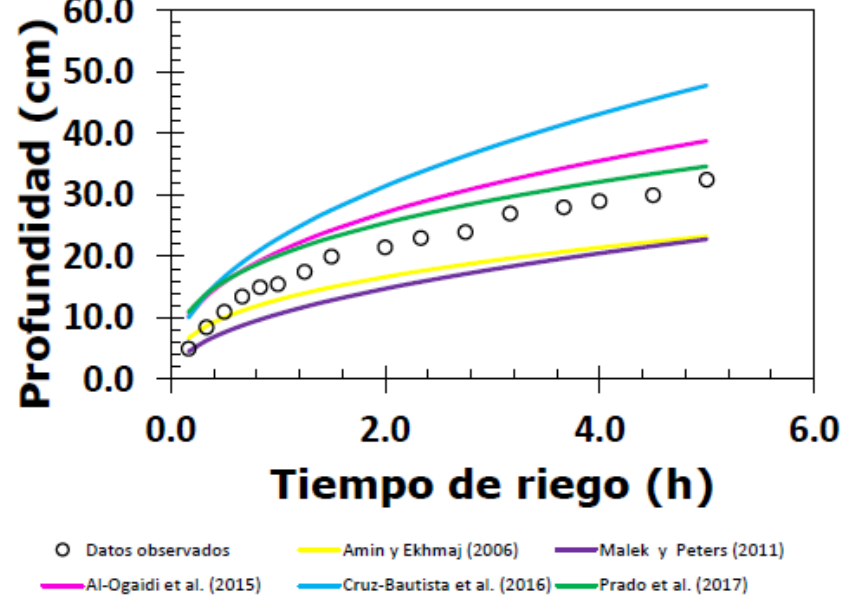
**Riego 6.  $q= 7.48$  lph**

# ANÁLISIS DE MODELOS EN PROFUNDIDAD

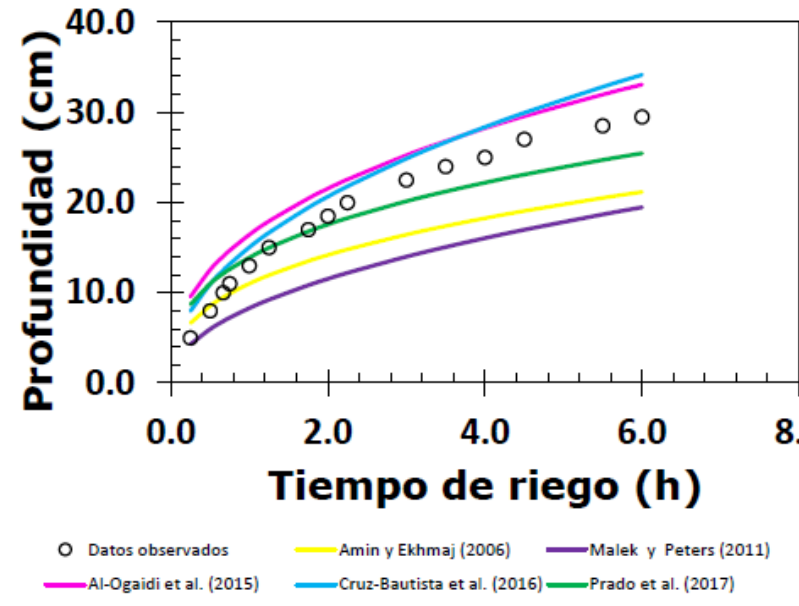




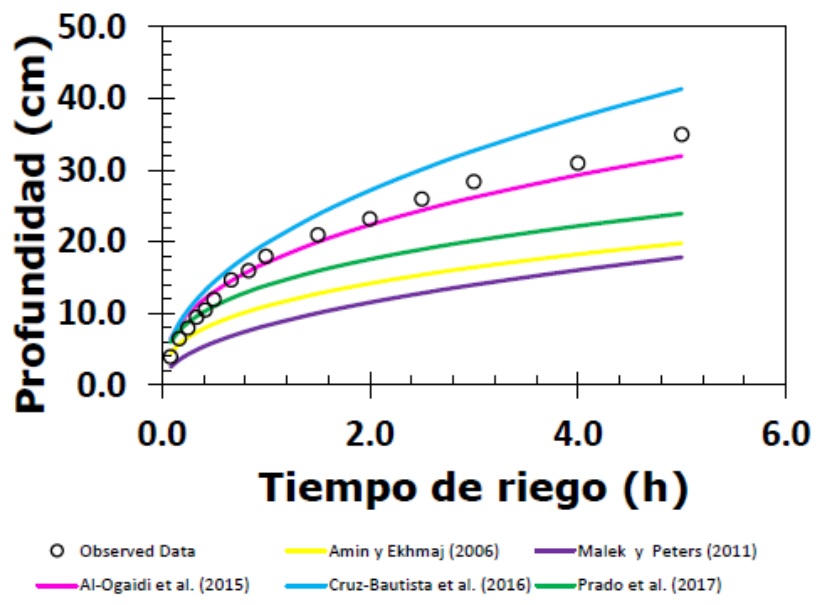
**Riego 1.  $q = 2.92$  lph**



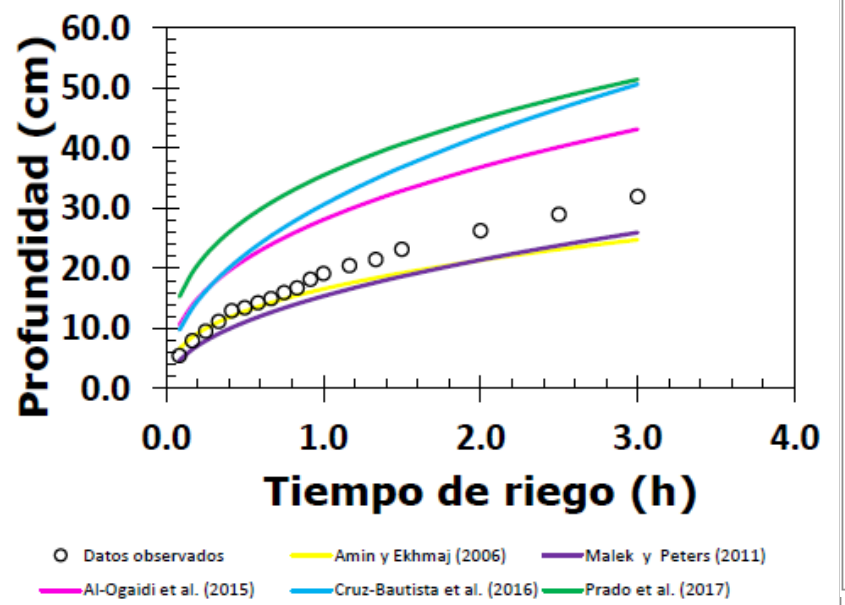
**Riego 2.  $q = 2.92$  lph**



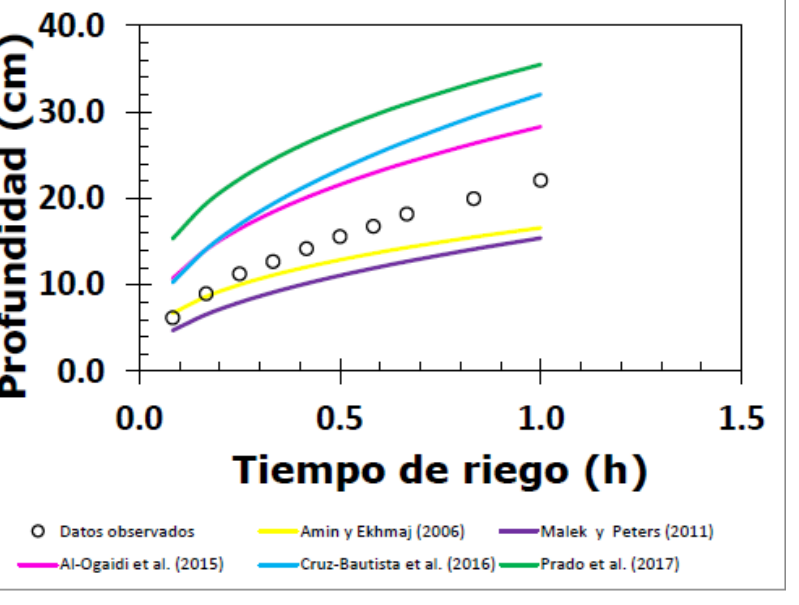
**Riego 3.  $q = 1.58$  lph**



**Riego 4.  $q = 1.58$  lph**



**Riego 5.  $q = 7.48$  lph**



**Riego 6.  $q = 7.48$  lph**

# CONCLUSIONES

El modelo de Amin & Ekhmaj (2006) fue el que mostró mayor constancia y mejor desempeño para estimar las dimensiones horizontal y vertical del frente de humedecimiento para las diversas condiciones de riego. Según los valores de EFICIENCIA y los criterios de desempeño de Ritter & Muñoz-Carpena (2013), el modelo de Amin & Ekhmaj (2006) resultó de aceptable a muy bueno en la estimación del diámetro y profundidad del bulbo húmedo en un suelo de textura franco arenosa (valores entre 0.66 a 0.96).

# BIBLIOGRAFÍA

- *Comisión Nacional del Agua. 2020. Programa Hídrico Nacional 2020-2024. Versión Online. Revisado el 10 de marzo de 2023*  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0)
- *Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. Tecnología y ciencias del agua, 7(1), 45-55.*
- *Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. Water, 14(11), 1827. DOI: 10.3390/w14111827*
- *FAO. 2020. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020. Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>*



**VIII** Congreso Nacional y  
**I** Congreso Internacional  
de Riego, Drenaje y Biosistemas  
COMEI - UAAAN 2023 | Saltillo, Coahuila  
4 al 6 octubre 2023



# GRACIAS!

**Ing. Alejandro Quintero Cabriales**

**[alejandro.quintero.c@vde](mailto:alejandro.quintero.c@vde)**

**+52 677 113 5957**

Fecha de presentación: 05 de octubre 2023



**AGRICULTURA**  
SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

