



Departamento de Hortalizas

Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica en colaboración con la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica.

PhD. Freddy Soto Bravo (freddy.sotobravo@ucr.ac.cr) Coordinador

Ing. Alejandro Betancourt Flores (alejandro.betancourt@ucr.ac.cr) Colaborador

Aplicación práctica del uso de curvas de liberación de aire: humedad en fibra de coco, para determinar la estrategia de manejo del riego óptima en un cultivo de acelga bajo invernadero”

I- Análisis y construcción de curvas de liberación de humedad y aire en sustratos, bajo invernadero.

Definición del problema: A diferencia del suelo, el uso de sustratos para producción agrícola posee variantes en la dinámica del agua que le confieren características especiales. Es por lo que **el uso de información referente a estudios realizados en suelos no es lo correcto**. Por lo tanto, se debe de conocer las características propias de cada sustrato a utilizar, así como la dinámica del agua en dicho medio.

El entorno físico en el cual se desarrollan las raíces de los cultivos consiste en su gran mayoría de la relación entre los volúmenes de agua, aire y sólidos presentes, así como el estado energético y contenido de agua. Esta última relación es un reflejo de la distribución de los poros del medio, que como se abordará provoca diferencias entre cada tipo de sustrato a utilizar (Fonteno, 1989; Quesada *et al.* 2005; Ha Rhie *et al* 2017).

Para la determinación de las curvas de retención de humedad, se puede emplear un método de laboratorio sencillo, en cual se somete el sustrato a succiones entre 0-100 cm de columna de agua (Eijkelkamp. 2014).

Generación de la curva en la “Caja de arena”

El equipo posee la capacidad de operar desde succiones de 0-100 cm de columna de agua.

Con el equipo se pueden generar varias determinaciones de propiedades físicas del sustrato, que son de mucha importancia en la dinámica de este. Entre estas se encuentran: -Porcentaje de aireación. -Densidad aparente. -Porcentaje de capacidad de contenedor. -Porcentaje de porosidad Total. -Porcentaje de componente sólido -*Curvas de libración de aire y humedad.* -*Agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total* (Soto. 2015).

El sistema es de fácil operación y accionamiento, en la figura 1 se detalla cada uno de sus componentes, así como el correcto acomodo del sistema.

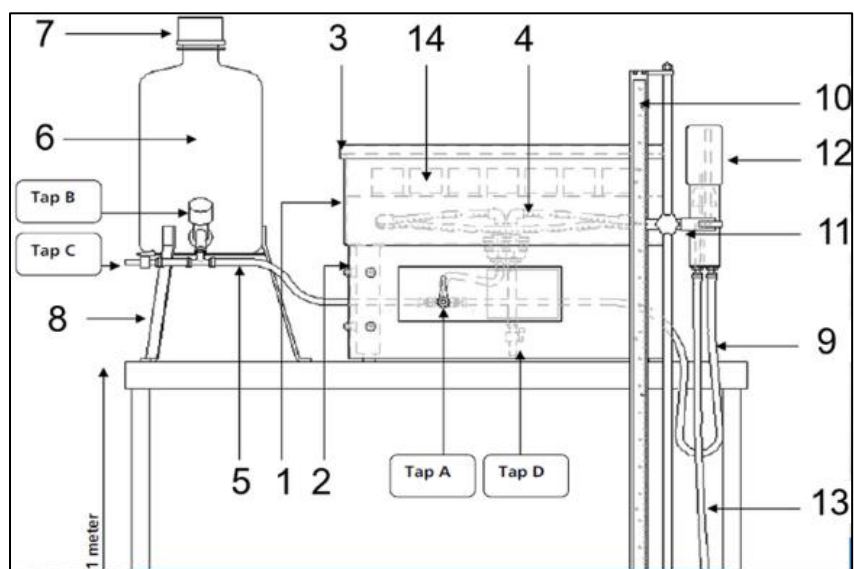


Figura 1. Descripción de la "Caja de arena". 1- Caja, 2- Marco de la caja, 3- Tapa de la caja, 4- Tubería de drenaje, 5- Tubería de abastecimiento, 6- Botella de abastecimiento, 7- Tapa de botella, 8- Base de la botella, 9- Tubería de descarga, 10- Soporte de medición deslizante, 11- Regulador de succión, 12- Reservorio de evaporación, 13- Tubería de salida, 14- Muestras (Eijkelkamp. 2014).

Antes de realizar cualquier medición con el equipo se debe de calibrar:

Se deben de sacar todas las burbujas que se generen en las tuberías, esto es debido a que la presencia de estas genera cavitación del sistema y por consiguiente una medición errónea.

El sistema debe de desinfectarse, el agua a utilizar debe poseer una concentración de **0.01 mg/L de sulfato de cobre** debido a que el uso continuo sin desinfectante genera la proliferación de algas dentro de las tuberías que llegan a obstruir las mismas.

Una vez realizado esto, en campo **las muestras que se tomen** se deben de **tomar haciendo uso de una herramienta de corte que provoque la menor perturbación posible**. Para esto se puede confeccionar dicha herramienta en base a los cilindros de volumen conocido que se emplearan en las determinaciones. En su mayoría **la empresa fabricante de la caja recomienda el uso de cilindros con volumen definido**. En este caso se empleará como **ejemplo el uso de cilindros de 100 cm³**. Por lo que la herramienta de corte se diseñó en base a estos.

La muestra al ingresar en el cilindro poseerá un volumen mayor al indicado, es por lo que se deben realizar cortes con un utensilio bien afilado justo al ras de los cilindros.



Figura 2. Cilindros de 100 cm³ utilizados para generación de curva de retención de humedad.

Una vez tomadas las muestras en campo, **mínimo 18 repeticiones**, se les coloca el "mesh" o malla y se procede a **saturar con agua 3 veces**, esto **hasta observar el brillo metálico del agua**. Si no se realiza este procedimiento los espacios porosos del sustrato no se llenarán adecuadamente y la dinámica del agua en el mismo será diferente.

*Nota: Se recomienda que, si se posee el tiempo, se realicen 2 saturaciones durante el primer día y se **deje en reposo toda la noche el sistema**. Al día siguiente proceder a realizar la tercera saturación.*



Figura 3. Colocación adecuada del "mesh" en cada cilindro y saturación con agua del sistema.

Una vez dentro de la caja de arena, se debe **volver a saturar** dentro de la misma. Para esto se coloca en 0 ó 100, dependiendo de la colocación de la regla del sistema, y se marcan los cilindros justo en medio indicando la medida de inicio. Esta medida será el 0 de inicio de la experimentación. Se coloca la regla de medición en posición y se deja reposar unos minutos.

Un procedimiento adicional es el **aislamiento de mínimo 6 muestras** las cuales servirán como "**testigo**" estas no serán influenciadas por la caja de arena ni el ambiente y se utilizarán para determinar la capacidad de contenedor real del sustrato, ya que se menciona que la capacidad de contenedor se alcanza en succiones de 1 kPa. Estas muestras servirán para contrastar dicho supuesto.



Figura 4. Ajuste de la regla de medición del sistema y saturación de muestras dentro de la caja de arena.

Se deben establecer las mediciones o los **parámetros de succión**. Estos dependerán de cada operador, así como de cada sustrato. Se recomienda para sustratos de fibra de coco el uso de las siguientes succiones: 0.25 kPa, 0.5 kPa,

1 kPa, 1.5 kPa, 2.0 kPa, 2.5 kPa, 3 kPa, 5 kPa, 7.5 kPa, 10 kPa. (Equivalentes a 2.5-100 cm columna de agua).

Una vez se procede a realizar cada succión, se debe **dejar en reposo el sistema por 24 horas**, las cuales son el mínimo de horas que las muestras deben reposar. Una vez transcurrido el tiempo se procede a **medir el contenido volumétrico de agua**. Para esta operación **se recomienda** el uso de **sensores GS3** los cuales son bastantes sensibles a los cambios en contenidos volumétricos. En el sistema de "DECAGON DEVICES" consola "PRO CHECK", utilizado en el laboratorio de hortalizas, se puede seleccionar que se mida el "**WVC Raw**" (**Water Volume Content**) el cual es el más adecuado debido, a que se censan **cambios** en la **permisibilidad dieléctrica** de la muestra en cuestión de milisegundos (Rubio *et al*, 2007).

Los sensores se deben ajustar para que las espigas **censen solo la mitad del cilindro**, ya que se ha comprobado que en el centro de la muestra es donde se deben realizar las mediciones. Esto es debido a que si no se realiza de esta manera se incurriría en un error, ya que la dinámica del agua genera que la parte superior del sistema esté más seco y la parte inferior más húmeda.



Figura 5. Mediciones con sensores GS3, ajustados a la mitad del cilindro.

Se deja que el sistema se estabilice y se procede a guardar la medición de contenido volumétrico de agua. Las **muestras deben** de ser **pesadas durante cada medición**, haciendo uso de una balanza analítica o cualquier otra a disposición que posea una adecuada resolución.

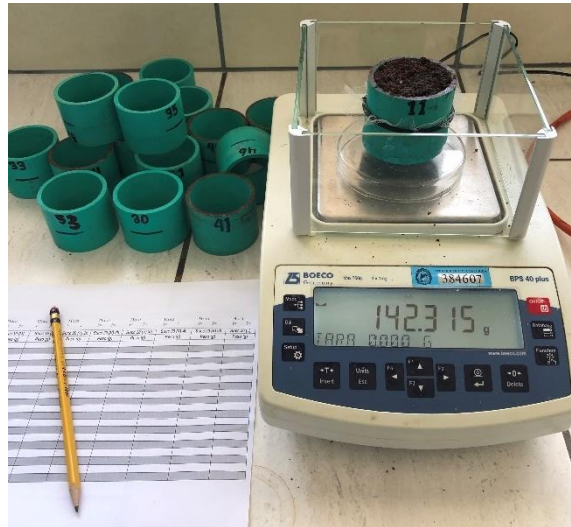


Figura 6. Ejemplo de mediciones de peso de cilindros + fibra + mesh + liga.

Para generar la curva de retención de humedad se debe de, primero generar una tabla en un software de estadística de preferencia.

La cual puede ser generada de la siguiente manera:

Tabla 1. Ejemplo de cálculo de peso húmedo del sustrato.

				Después de succión (dds)		
Succión	Succión	Anillo	Volumen anillo (cm ³)	P. anillo + liga + malla (g)	P. sustr hum + anillo + liga + malla (g)	P. sustr hum (g)
2,5	1	1	97,691	42,242	138,076	=F5-E5
2,5	2	2	97,691	42,740	141,376	
2,5	3	3	97,691	42,862	144,054	101,192

En esta se especifica la succión, así como cual anillo se utiliza y su volumen. Es muy **importante registrar el peso correcto de cada anillo y sus componentes** ya que estos serán utilizados para las determinaciones.

Tabla 2. Ejemplo de cálculo del peso seco del sustrato y del agua.

Después de secado				Después de secado			
Peso recip. de secado (g)	P. sustr hum + recip. De secado (g)	Peso fibra seca (g)	P. sustr hum (g)	Peso recip. de secado (g)	P. sustr hum + recip. De secado (g)	Peso fibra seca (g)	Agua (g)
42,242	51,402	=15-H5	95,834	42,242	51,402	9,160	=+G5-J5
42,740	52,069		98,636	42,740	52,069	9,329	
42,862	52,727	9,865	101,192	42,862	52,727	9,865	91,33

Tabla 3. Ejemplo de cálculo de la humedad gravimétrica del sustrato.

P. sustr hum (g)	Después de secado			Agua (g)	HG (g agua /g ms)
	Peso recip. de secado (g)	P. sustr hum + recip. De secado (g)	Peso fibra seca (g)		
95,834	42,242	51,402	9,160	=((G5-J5)/J5)	
98,636	42,740	52,069	9,329		
101,192	42,862	52,727	9,865	91,33	9,26

Tabla 4. Ejemplo de cálculo de la densidad aparente de las muestras.

Volumen anillo (cm ³)	Después de secado			Agua (g)	HG (g agua /g ms)	Den.Apa (g ms/ ml sust)
	Peso recip. de secado (g)	P. sustr hum + recip. De secado (g)	Peso fibra seca (g)			
97,691	42,242	51,402	9,160	86,67	9,46	=+J5/D5
97,691	42,740	52,069	9,329	89,31	9,57	
97,691	42,862	52,727	9,865	91,33	9,26	0,10

Tabla 5. Ejemplo de cálculo de la humedad volumétrica de las muestras.

Agua (g)	HG (g agua /g ms)	Den.Apa (g ms/ ml sust)	HV (cm ³ /cm ³)	HV (%)	RAW	RAW
86,67	9,46	0,09	=L5*M5	88,72	22,61	22,26
89,31	9,57	0,10		91,42	27,64	26,32
91,33	9,26	0,10	0,93	93,49	26,54	26,62

Ahora bien, componentes como porcentaje de **capacidad de contenedor (CC)** se obtienen de **promediar** todos los valores de aquellos **cilindros aislados, junto** con aquellos que fueron **sometidos a succiones de 1 kPa (CC)** y que concordaron con las mediciones de los aislados (Soto. 2018).

El porcentaje de **capacidad de aireación** se obtiene de la **división** de los **mL drenados** por las muestras **a CC** entre el **volumen del cilindro**. $14.777\text{mL}/97.691*100=15.13\%$. La **porosidad total** no es más que una **suma** de los componentes porcentaje de **capacidad de aireación** y porcentaje de **capacidad de contenedor (CC)** y el **componente sólido** una resta del 100% de partículas menos la **porosidad total** (Soto. 2018).

Una vez se obtienen las variables calculadas se puede generar un **cuadro o tabla resumen** para **mayor facilidad de observación de datos**, en este se puede adjuntar además los parámetros óptimos reportados en literatura de cada componente.

Tabla 6. Resumen de características físicas del sustrato. n= 195.

	Cilindros	ÓPTIMO
% C. aireación	15,13	15-30%
D. aparente	0,096	----
% C. contenedor	78,34	55-70
% Porosidad total	93,47	> 85%
C. sólido	6,53	< 15%

Luego se procede a generar el gráfico de dispersión, con el cuál se analizará qué tan confiables son los datos generados. Se pueden analizar muchas variables, pero las dos de interés a contrastar son: **el porcentaje de humedad volumétrica versus el RAW.**

El R^2 nos indicará que tanto se parecen los datos, así que entre más cercano a 1 sea este serán mejores.

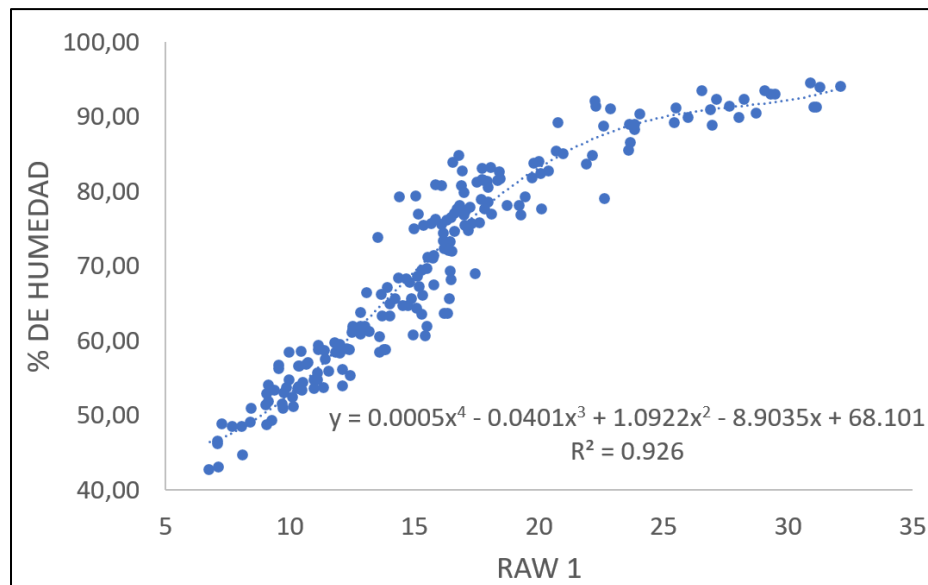


Figura 7. Gráfica de la dispersión de los valores de humedad volumétrica vs el RAW. n= 195.

Una vez confirmada la validez estadística de las mediciones, se procede a realizar el cálculo de los litros contenidos en cada saco de fibra de coco según la humedad volumétrica en el cual este se encuentre. Para esto se debe tomar en cuenta el **volumen del contenedor** de cada sistema, en este caso el volumen sería: **15cm x 12cm x 100cm= 18.2 L.**

Tabla 7. Ejemplo de cálculo de los litros contenidos en los sacos de fibra de coco según cada porcentaje de humedad volumétrica.

Componentes totales: Partículas, aire y agua	100,0	--	18,2
Humedad volumétrica (%)	%		Vol. (L)
0 kPa (saturado)	93,47	--	=+ $\$E\$12 * C14 / 100$
0,25 kPa	92,11		16,8
0,5 kPa	89,42		16,3
1 kPa (capacidad de contenedor)	78,34	55-70	14,26
1,5 kPa	71,36		12,99
2,0 kPa	65,12		11,9
2,5 kPa	61,78	--	11,2
3 kPa	59,72		10,9
5 kPa	54,73	30-40	10,0
7,5 kPa	53,01	--	9,6
10 kPa (Punto de marchitez)	52,35	25-30	9,5

Tabla 8. Ejemplo de cálculo del porcentaje de agua fácilmente disponible.

Humedad volumétrica (%)	%		Vol. (L)
0 kPa (saturado)	93,47	--	17,0
0,25 kPa	92,11		16,8
0,5 kPa	89,42		16,3
1 kPa (capacidad de contenedor)	78,34	55-70	14,26
1,5 kPa	71,36		12,99
2,0 kPa	65,12		11,9
2,5 kPa	61,78	--	11,2
3 kPa	59,72		10,9
5 kPa	54,73	30-40	10,0
7,5 kPa	53,01	--	9,6
10 kPa (Punto de marchitez)	52,35	25-30	9,5
Tipos de agua (%)	%		L
Agua fácilmente disponible	=+ $C17 - C22$	20-30	4,3
Agua de reserva	2,37	5,0-10,0	0,4
Agua total disponible	25,99	24-40	4,7
Agua no disponible	52,35	--	9,5
Agua total CC	78,34		14,26
	25,99		4,73

Una vez obtenido el porcentaje se calculan los litros de agua fácilmente disponibles; tabla 9, se le suman los de reserva y se obtiene el agua total disponible.

Tabla 9. Ejemplo de cálculo de los litros de agua fácilmente disponibles.

Tipos de agua (%)	%	L
Agua fácilmente disponible	23,62	4,7
Agua de reserva	2,37	0,4
Agua total disponible	25,99	4,7
Agua no disponible	52,35	9,5
Agua total CC	78,34	14,26
	25,99	4,73

Una vez determinados los volúmenes se puede generar la curva de retención de humedad del sustrato bajo estudio; figura 8, en donde se detalle los puntos más importantes para la determinación del riego, así como los valores de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible. Todo esto para una mejor apreciación de las estimaciones realizadas.

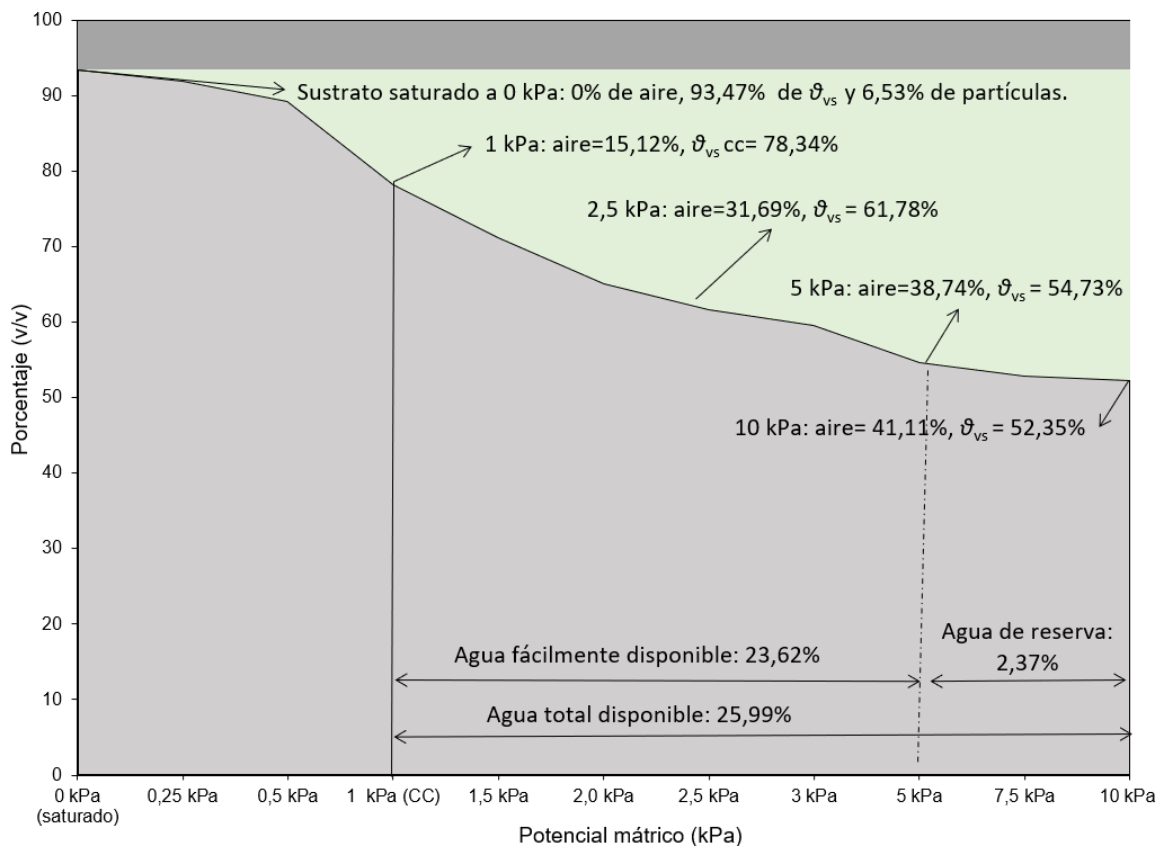


Figura 8. Gráfica del porcentaje volumen/volumen vs potencial mátrico en kPa.

Ahora bien, a pesar de todas las previsiones a la hora de medir el RAW en la caja de arena al extrapolar los datos a un componente mayor, en este caso una paca de fibra de coco de 15cm x 12cm x 100cm se logró determinar que el **RAW medido en la parte media** del sistema **posee una gradiente** de aproximadamente **1,92 veces el valor de RAW determinado en la caja de arena**, todo esto medida in situ. En la tabla 11 se detalla esta gradiente.

Tabla 10. Cálculo del RAW que será medido por los sensores GS3 in situ.

HV (%)	RAW 1	RAW 2	RAW 1 x factor
88,72	22,61	22,26	43,41
91,42	27,64	26,32	=B3*1,92
93,49	26,54	26,62	51,08
92,26	28,24	23,10	54,35
91,26	31,05	28,02	59,76

Tabla 11. Cálculo del factor de conversión de RAW en la caja de arena a RAW in situ, parte media.

Hora	GS3 1		Factor
	Arriba	Medio	
01:05	17,63	36,07	2,05
01:08	16,58	29,26	1,76
01:10	15,31	29,35	1,92
01:12	21,37	36,16	1,69
01:14	19,84	38,91	1,96
01:16	17,30	31,24	1,81
01:18	26,16	57,44	2,20
01:20	17,79	34,81	1,96
01:22	15,18	28,48	1,88
01:24	13,56	25,36	1,87
01:30	15,71	31,88	2,03
01:34	17,16	32,55	1,90
01:38	17,04	32,37	1,90
02:13	16,77	31,15	1,86
02:15	19,30	37,22	1,93
02:17	17,49	35,81	2,05
02:19	21,93	41,46	1,89
02:22	20,80	41,80	2,01
Promedio	18,16	35,07	1,92

Todo esto se realiza debido a que, **a la hora de automatizar el riego**; mediante la medición constante con los sensores de GS3, **se deben de tomar las previsiones** del caso para que las mediciones sean las correctas y con esto los volúmenes de riego.

Con lo que la **ecuación del polinomio grado 4 cambia**; figura 9, y es la correcta con la cual se debe operar en campo.

$$f(x) = 3.52801153514403E-05 x^4 - 0.005630336543353 x^3 + 0.294827414716939 x^2 - 4.62585200258151 x + 68.1014669081143$$
$$R^2 = 0.925964169994388$$

Figura 9. Ecuación de la línea de tendencia del polinomio grado 4 generado por los valores de dispersión, de humedad volumétrica vs RAW multiplicado por factor.

II- Validación de curvas de liberación de humedad y aire en sustratos, bajo invernadero

Definición del problema: La escasez de recursos esenciales para la producción de alimentos y las amenazas del cambio climático son dos de los retos principales que enfrenta la agricultura sostenible del siglo XXI. Se estima que, para los siguientes 20 años la población mundial llegue a alcanzar los nueve mil millones de habitantes (Tilman et al., 2002). La creciente demanda de alimentos asociado al crecimiento de la población mundial y el cambio climático, presagian un incremento sustancial en la demanda de las reservas de agua dulce para el riego y de las reservas de minerales en el planeta. Esto supone una mayor limitación en el uso de recursos naturales en la agricultura, ya que los recursos hídricos, representan solo el 1,5% del total de agua disponible en el planeta, donde el sector agropecuario, principal consumidor, demanda un 69% del total (FAO, 2017).

Cuando se cultivan hortalizas bajo invernadero, su crecimiento, formación de los racimos florales y desarrollo de frutos, es muy diferente a lo que se obtiene de una plantación a campo abierto. Muchas de estas diferencias radican el efecto provocado por las diferencias en la temperatura y consecuentemente en la acumulación de grados día por la planta. Además, las prácticas de manejo del cultivo como lo son la fertilización o las podas provocan que la planta reaccione de una forma diferente (Morales et al., 2006); (Escobar & Lee, 2009). En un sistema hidropónico, se requiere reducir la evapotranspiración del cultivo (ETc), ya sea, disminuyendo la evaporación de la superficie del medio de cultivo o la transpiración de las plantas.

En el cultivo hidropónico, puesto que el sustrato se encuentra dentro de un contenedor cubierto de plástico, la evaporación es despreciable, mientras que, la transpiración se puede limitar mediante el uso de riego deficitarios (RD). El uso de RD ha sido ampliamente estudiado en cultivos frutales como un método para mejorar la Eficiencia en el Uso del agua (EUA); sin embargo, ha sido muy poco estudiado en cultivos hortícolas a campo abierto y mucho menos bajo condiciones de invernadero (Soto et al., 2020).

Por lo que se desea validar las curvas de liberación de humedad y aire en sustratos y bajo invernadero.

CASO ACELGA VS AGOTAMIENTOS

Para el desarrollo de este ensayo, **se propuso el uso de 6 tratamientos de agotamiento del contenido volumétrico de agua en el sustrato, manteniendo un gradiente constante** de disminución partiendo de la humedad a capacidad contenedor (CC).

Debido a observaciones realizadas por el personal colaborador, **se descubrió que el cultivo de acelga posee una sensibilidad muy alta a la falta de agua, por lo que se decidió el uso de este para la experimentación previa.** Además, **el ciclo de este es corto** yendo de 4-5 semanas como máximo.

VARIABLES QUE ESTUDIAR

Categorías: Día y Tratamientos

Numéricas: Humedad, Altura y Peso.

Durante el desarrollo del ensayo se realizaron mediciones del comportamiento morfológico del cultivo. Una de las **variables más determinantes fue la altura** de este, en donde se pudo observar como las **plantas que poseían un porcentaje de agotamiento menor poseían una mayor altura y viceversa** (Figura 10) (Figura 12), pero con una tendencia curiosa **ya que alcanzado su máximo desarrollo las plantas sometidas a porcentajes de 5% detenían su crecimiento, cosa contraria con aquellas que poseían agotamientos mayores** en donde se podía observar cómo estas se adaptaban al medio y **retomaban su crecimiento de nuevo, tratando de emparejar su tamaño en el tiempo**, o viéndolo de otra manera su acumulo de grados días se encontraba estancado, **luego de adaptarse retomaba su crecimiento pero ya con un retraso y reducciones en el rendimiento.**

A pesar de estas diferencias en altura, se dio un **hecho interesante en donde el peso seco promedio de las plantas varió.** Las **plantas de 16% de agotamiento** de humedad volumétrica **obtuvieron pesos promedios mayores** en comparación a los demás tratamientos (Figura 11). Lo cual denota que **más agua no es necesariamente traducido como mayor eficiencia** en el uso de la misma ni mayor desarrollo, al parecer las plantas de esta hortaliza sometidas a un 16% de agotamiento tienen un balance adecuado que les permite un desarrollo óptimo.

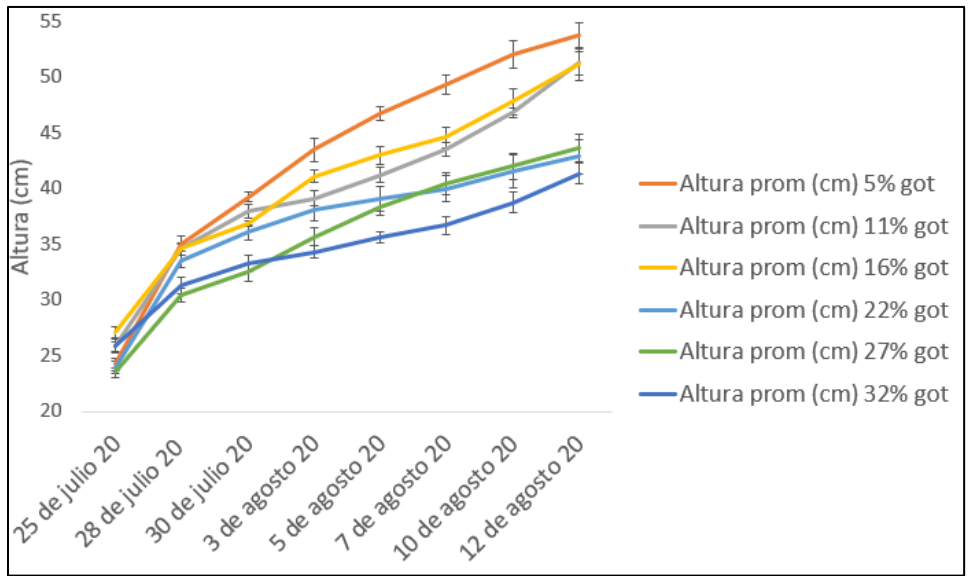


Figura 10. Crecimiento en altura (cm) de plantas de acelga (*Beta vulgaris* var. cicla) sometidas a 6 porcentajes de agotamiento de humedad volumétrica. n = 9

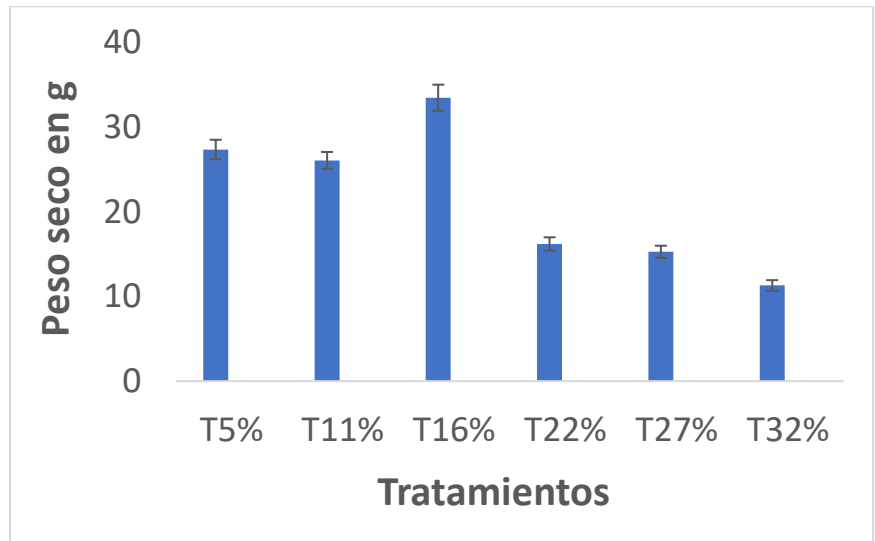


Figura 11. Peso seco promedio (gramos) de plantas de acelga (*Beta vulgaris* var. cicla) sometidas a 6 porcentajes de agotamiento de humedad volumétrica. n = 9



Figura 12. Imágenes tomadas de plantas de acelga (*Beta vulgaris* var. cicla) producidas bajo 6 porcentajes de agotamiento de humedad volumétrica.

Verificación de supuestos Análisis de la normalidad

Debido a lo observado y para verificar los supuestos, los datos se sometieron a la prueba de Kolmogórov-Smirnov, la cual permite estudiar si una muestra procede de una población con una determinada distribución (media y desviación típica), y no está limitado únicamente a la distribución normal.

Se analizó la distribución de los datos antes de proceder a analizar el ANOVA, como se observa en la Figura 13, la muestra posee una distribución adecuada con un p-Value de 0.7715 (Tabla 12).

Como el valor de p fue mayor que 0,05 no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay evidencias suficientes para pensar que la muestra proviene de la distribución especificada, con un nivel de significación del 5%.

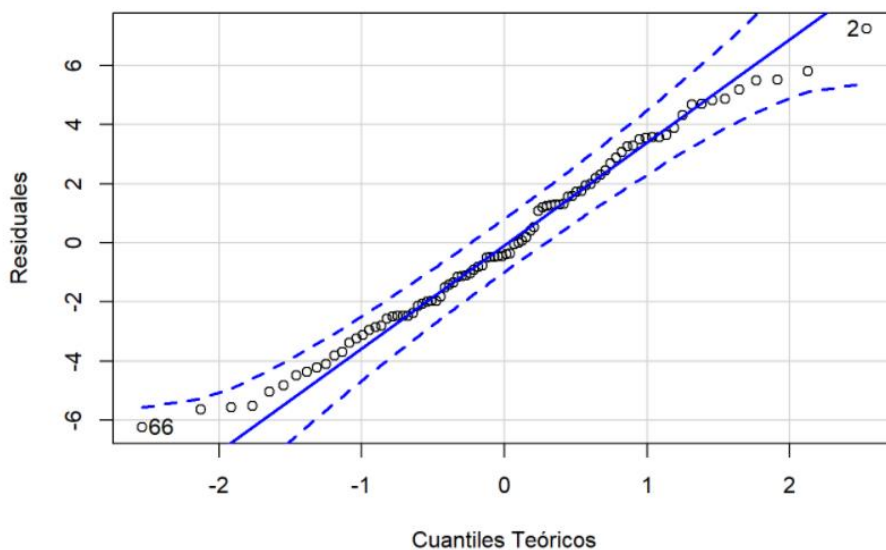


Figura 13. Gráfica de los residuales vs los cuantiles teóricos del modelo generado (mod1).

Tabla 12. Prueba de Kolmogórov-Smirnov derivada del modelo 1, en donde se analiza la distribución de los valores de humedad volumétrica.

```
ks.test(mod1$residuals,"pnorm",0,sd(mod1$residuals))
```

```
##  
## One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
##  
## data: mod1$residuals  
## D = 0.068145, p-value = 0.7715  
## alternative hypothesis: two-sided
```

Posterior, se procedió a analizar las diferencias entre las medias de la muestra, dando como resultado, que hay una interacción entre la altura y la humedad, así como entre el peso y la humedad. Pero sin una interacción entre la altura y el peso (Tabla 13), confirmando que

las curvas de liberación de agua y aire del sustrato se lograron desarrollar de la mejor manera, dando un dato acertado de la cantidad real de agua retenida en los poros del sustrato.

Tabla 13. Análisis de la varianza del modelo 1 generado, tomando como variable respuesta la humedad volumétrica.

```
anova(mod1)
```

```
## Analysis of Variance Table
##
## Response: Humedad
##           Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
## Altura      1  48.54   48.54  4.8189  0.03084 *
## Peso        1 409.90  409.90 40.6926 8.616e-09 ***
## Altura:Peso  1  13.49   13.49  1.3388  0.25044
## Residuals  86 866.29  10.07
```

Con la información recopilada se puede avanzar al siguiente paso, la generación de tecnología para el manejo agronómico de híbridos costarricenses de chile dulce y tomate bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica.

Literatura citada

Escobar, H., & Lee, R. (2009). Manual de producción de tomate bajo invernadero. In Manual de producción de tomate bajo invernadero (Vol 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Eijkelkamp. 2014. Sandbox Operating instructions, M1.08.01.E. Netherlands. P.O. Box 4, 6987 ZG Giesbeek. Disponible en: <file:///C:/Users/ale-b/Downloads/M1-0801e%20Sandbox.pdf>

FAO. (2017). Water for Sustainable Food and Agriculture Water for Sustainable Food and Agriculture. In A report produced for the G20 Presidency of Germany. www.fao.org/publications

Fonteno, W. 1989. An approach to modeling air and water status of horticultural substrates. Department of Horticultural Science. North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7609. 238: 67-74.

Morales, D., Rodríguez, P., Dell'Amico, J., Torrecillas, A., & Sánchez, M. (2006). Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill. cv. amalia). 27(1), 45–48. https://www.researchgate.net/publication/237028275_EFECTO_DE_ALTAS_T

EMPERATURAS EN ALGUNAS VARIABLES DEL CRECIMIENTO Y EL INTERCAMBIO GASEOSO EN PLANTAS DE TOMATE *Lycopersicon esculentum* Mill CV AMALIA

- Ha Rhie, Y; Kim J. 2017. Changes in Physical Properties of Various Coir Dust and Perlite Mixes and Their Capacitance Sensor Volumetric Water Content Calibrations. *HORTSCIENCE* 52(1):162–166. 2017. doi: 10.21273/HORTSCI11362-16
- Quesada, G; Méndez, C. 2005. Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía Mesoamericana*. Vol. 16, numero 02. Universidad de Costa Rica, Alajuela, Costa Rica. ISSN: 1021- 7444. pp. 177-183
- Rubio, C; González, C; Josa, R. 2007. Monitorización del contenido de agua en los sustratos de restauración minera: calibración de las medidas de TDR en laboratorio y campo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* Vol. VIII.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Soto, F., Araya, E. A., & Echandi, C. (2020). Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce ‘Dulcítico’, en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 43–64. www.mag.go.cr/rev_agr/index.html
- Soto, F. 2015. Oxifertirrigación química mediante riego en tomate hidropónico cultivado en invernadero. *Agronomía Mesoamericana*. 26(2):277-289. ISSN 1021-7444
- Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 42(2): 59-73. ISSN:0377-9424