

Influencia del bulbo húmedo efectivo en el diseño de sistemas de riego por goteo

Influence of the Effective Wet Bulb on the Design of Drip Irrigation Systems



<https://cu-id.com/2177/v33n3e01>

✉Ernesto Javier Ortíz-Samprón^{1*}, ✉Dayana Castañeda-Velázquez¹, ✉Pável Vargas-Rodríguez¹,
✉Alberto Méndez-Jocik^{II}, ✉Abel Dorta-Armaignac^{III}, ✉Elio Quiala-Ortíz^I

^IUniversidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba.

^{II}Empresa Nacional de Proyectos Ingeniería, Departamento de Diseño, La Habana, Cuba.

^{III}Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos, Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN: En el riego por goteo, el volumen de suelo mojado representa la cantidad de agua almacenada y su extensión, profundidad y diámetro deben coincidir con el sistema radicular de la planta y el espaciamiento entre emisores, sin embargo, en la práctica del diseño, no se considera el radio de humedecimiento efectivo que alcanza estos dispositivos. Se comparan los resultados del diseño agronómico obtenido con procedimientos concebidos para condiciones específicas, y se identifican los efectos que sobre los parámetros de explotación ejerce los parámetros de diseño. Se utilizó el método de análisis y síntesis, a partir de la comparación de tres procedimientos de diseño, uno empleando los criterios expuestos por Arapa /2002, el segundo, teniendo en cuenta los criterios expuestos por Cruz-Batista et al. /2015 y el tercero utilizando el procedimiento alternativo que se aplica en las UEB de Consultoría y Diseño de la ENPA. Los resultados mostraron la viabilidad de utilizar modelos experimentales para al diseño de sistemas de riego por goteo, ante la imposibilidad de realizar pruebas de campo, estas herramientas permiten prever el avance lateral y vertical del agua debajo de los emisores. Se constató que la transferencia de humedad debajo de los emisores, es función del volumen de agua aplicada, el caudal del emisor, la conductividad hidráulica saturada, el contenido de humedad inicial y residual y de limo en el suelo. Esta comparación permite afirmar la validez de utilizar modelos de simulación para estimar la separación entre emisores necesarios para humedecer el volumen de suelo requerido.

Palabras clave: radio efectivo, bulbo húmedo, humedecimiento efectivo, diseño agronómico, emisores de goteo.

ABSTRACT: In drip irrigation, the volume of wetted soil represents the amount of water stored and its shape and dimensions should correspond to the plant root system and the spacing between emitters, however in design practice, the effective wetting radius reached by these devices is not considered. The results of the agronomic design obtained with different design procedures are compared and their effects on operating parameters are identified. The analysis and synthesis method was used, based on the comparison of three design procedures, one using the criteria set out by Arapa /2002, the second, taking into account the criteria set out by Cruz-Batista et al. /2015 and the third using the alternative procedure applied in the UEB Consultancy and Design of the ENPA. The results showed the feasibility of using experimental models for the design of drip irrigation systems, given the impossibility of carrying out field tests; these tools make it possible to predict the lateral and vertical advance of water under the emitters. It was found that moisture transfer under the emitters is a function of the volume of water applied, the flow rate of the emitter, the saturated hydraulic conductivity, the initial and residual moisture content and the silt content of the soil. The comparison allowed affirming the validity of using simulation models to estimate the emitter spacing necessary to wet the required soil volume.

Keywords: Effective Radius, Wet bulb, Effective Wetting, Agronomic Design, Drip Emitters.

*Autor para correspondencia: Ernesto Javier Ortíz-Samprón, e-mail: ernesto.ortiz@estudiantes.uo.edu.cu.

Recibido: 13/10/2023

Aceptado: 14/06/2024

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

CONTRIBUCION DE AUTOR: **Conceptualización:** E. Ortíz. **Curación de datos:** D. Castañeda. E. Ortíz. **Análisis formal:** P. Vargas. E. Ortíz. A. Méndez. **Investigación:** E. Ortíz. D. Castañeda. A. Méndez. A. Dorta. P. Vargas. Elio Quiala. **Metodología:** E. Ortíz. P. Vargas. A. Méndez. A. Dorta. D. Castañeda. Elio Quiala. **Supervisión:** E. Ortíz. D. Castañeda. A. **Papeles/ Redacción, borrador original:** E. Ortíz. D. Castañeda. **Redacción, revisión y edición:** E. Ortíz. P. Vargas.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

En el riego por goteo el suministro de agua permite mantener la humedad en la zona radicular en condiciones de baja tensión. [Keller & Bliesner \(1990\)](#), considera que el bulbo húmedo que se obtiene, normalmente alcanza su máximo diámetro aproximadamente a una profundidad de 30 cm y su forma está condicionada fuertemente por las propiedades hidrofísicas del suelo. Posteriormente [Hernández \(1990\)](#) propone que el mismo debe tener como referente la zona de ramificación densa del cultivo, específicamente a una profundidad, entre el 90 y el 120 % de esta.

A los efectos del diseño, lo importante es garantizar un volumen de raíces humedecido que favorezca la extracción de agua y nutrientes por parte de las plantas, así como su anclaje en el suelo, pero en la práctica, se ha generalizado el uso de la superficie humedecida por el emisor, que es un parámetro más fácil de obtener y permite estimar de manera aproximada el número de emisores que humedecen una misma planta. En este sentido [Dorta \(2017\)](#) ha desarrollado investigaciones que abordan los óptimos de humedad de la zona húmeda en los sistemas, las cuales aún no son concluyentes.

[Arapa \(2002\)](#) corrobora lo planteado por [Hernández \(1990\)](#) y asegura que la profundidad del bulbo debe estar comprendida entre el 0.9 y el 1.2 de la profundidad de las raíces, a la menor profundidad del bulbo corresponde mayor número de emisores y mayor eficiencia desde el punto de vista agronómico, pero la instalación resulta más cara. La mayor profundidad del bulbo puede ser la más adecuada para que actúe como fracción de lavado en el control de la salinidad, salvo que la calidad del agua exija mayor fracción de lavado, en cuyo caso no se considera la restricción de la profundidad del bulbo expresada anteriormente. También es posible encontrar una correlación lineal con los pares de datos de campo volumen y profundidad obtenidos en campo.

De acuerdo con [Arapa \(2002\)](#), tanto la profundidad como el diámetro mojado se pueden determinar mediante las siguientes modalidades: a) pruebas de campo, b) fórmulas y c) tablas. Dada la gran heterogeneidad de los suelos, las fórmulas y tablas solo se deben utilizarse en el diseño con mucha prudencia, siendo mucho más fiable la medición directa en campo. Esta situación ha conllevado a la aplicación de procedimientos de diseño alternativos que no consideran la realización de las pruebas de campo, resultando que no se garantice el uso racional y eficiente del agua de riego, ya sea por su aplicación en exceso o por defecto.

Autores como [Amin & Ekhmaj \(2006\)](#); [Elmaloglou & Diamantopoulos \(2009\)](#) y [Cruz-Bautista et al. \(2015\)](#), aseguran que si se conoce la distribución del agua dentro del volumen de suelo mojado, el o los

emisores se pueden ubicar y manejar de tal forma que se garantice la colocación precisa del agua y nutrientes en la zona radicular de las plantas ([Allen et al., 2006](#)). Los procedimientos de diseño que tienen en cuenta las características de esta distribución conducen a una utilización más racional del agua de riego en las instalaciones ([Pizarro, 1996](#); [ASABE, 2007](#); [Cruz-Bautista et al., 2016](#)).

En este sentido la finalidad de la investigación consiste en establecer criterios técnicos que demuestren la validez de considerar desde el diseño de las instalaciones el diámetro efectivo que se produce debajo de los emisores de riego por goteo y la importancia de utilizar herramientas informáticas para estimar la transferencia de humedad debajo de los emisores, ante la imposibilidad práctica de realizar las pruebas de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Identificación de la Tarea Técnica

La Tarea Técnica fue confeccionada por el Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), a solicitud del Grupo Empresarial Agroforestal (GAF) y bajo la supervisión del Comité Técnico Evaluador (CTE) de Riego y Drenaje, la información contenida en la misma fue utilizada en el diseño agronómico de las tres variantes: una, utilizando la propuesta de [Arapa \(2002\)](#), la segunda variante aplicando las experiencias obtenidas por [Cruz-Bautista et al. \(2015\)](#) y la tercera variante, empleando el procedimiento alternativo muy utilizado en la práctica.

Caracterización del complejo Agua - Suelo - Planta - Clima

Fuente de abasto

La fuente de abasto es el río Contramaestre, perteneciente al municipio homónimo de la provincia Santiago de Cuba. El agua de riego se bombea desde la margen izquierda del río en un punto ubicado a 200 m de la confluencia con el río Cauto. Como medida de la salinidad del agua de riego se asumió la conductividad eléctrica del agua de riego = 1,2 dS/m correspondiente a aguas de riego de salinidad media ([Pizarro, 1996](#)).

Por su influencia en los resultados del diseño agronómico y en el manejo a posteriori del agua de riego de la instalación, este parámetro debe verificarse y controlar su comportamiento durante la vida útil del sistema de riego, debido a que la salinidad del agua contribuye a obstruir los pequeños diámetros de salida de los gateros, sobre todo cuando la naturaleza de las sales es más peligrosa, la fuente de abasto se considera apta para el riego del cultivo propuesto ([Pizarro, 1985; 1990](#)).

Datos del suelo

Los suelos arenosos tienen baja capacidad de almacenamiento de agua y un alto valor de infiltración. Por lo tanto, necesitan la aplicación frecuente de riegos pequeños, especialmente cuando el suelo además de arenoso es de poca profundidad. Bajo esas circunstancias el riego por aspersión de baja presión y el riego localizado son más adecuados.

El suelo del caso de estudio ([Tabla 1](#)), es característico de la zona montañosa, de relieve uniformemente ondulado, con pendientes ligeramente suaves en las parcelas de riego, no se conoce el valor de la velocidad de infiltración estabilizada del suelo. Se previó no ubicar las tuberías laterales a favor de la pendiente para evitar el posible riesgo de escorrentía superficial, además se tuvo en cuenta la baja intensidad de aplicación de los goteros. No se aportaron los datos de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo. Se asumió para el diseño de las variantes 2 y 3 un valor de CEes = 2,3 dS/m tomado de cultivos similares y para una afectación de la producción correspondiente al 10%, ([Pizarro, 1985](#)).

Características del cultivo a beneficiar

El cultivo beneficiado es café Robusta, con marco de plantación de 3 m entre hileras y 3 m entre plantas, con profundidad a humedecer de 0,40m y un coeficiente de cultivo en la fase media del ciclo vegetativo = 1.04. De acuerdo con [Vigoa-Hernández \(2000\)](#) la tolerancia del cultivo a la inundación oscila entre 2 y 3 días.

Datos climáticos

No se conocen los valores de la dirección y velocidad de los vientos predominantes, así como tampoco la altitud de la zona, la temperatura, la Humedad Relativa y la velocidad y dirección de los vientos predominantes. Solamente se aportaron los datos referidos a la evapotranspiración del cultivo de referencia, de acuerdo con la tarea técnica se utilizó ETo = 3.95 mm/d en correspondencia con la región oriental de Cuba.

Agregados de riego

Se dispuso para el diseño de goteros integrados en la tubería, autocompensantes, auto limpiante, anti raíces, anti succión, con las tuberías laterales soterradas. De acuerdo a la información de la tarea técnica, el caudal del gotero = 4 L/h separados a 0,60m a lo largo del lateral, de manera que el número de emisores por planta garantice humedecer el 50% del área vital del cultivo y formar una banda continua de humedecimiento. Se utilizó para el diseño de la variante 1, un coeficiente de localización ($K_L = 0,67$) y un coeficiente de uniformidad ($CU \geq 90\%$).

Se consideró para los tres procedimientos de diseño, emisores de categoría “A” avalados por prueba de laboratorio según normas NC ISO 8026: 2014 (2014) y UNE 68-075-86, 68-076-89 citadas por [Reyes-Requena et al. \(2023\)](#). Se recomienda presentar la relación caudal - presión del emisor y el coeficiente de variación de fabricación (C_{VF}) menor del 5%. Los laterales deben ser fácilmente desmontables y con conexión espiga - rosca.

Procedimientos de diseño agronómico de sistemas de riego por goteo

Según [Pizarro \(1996\)](#), en el cálculo agronómico es la parte del diseño donde los errores tienen consecuencias más graves, mediante el mismo, se garantiza estimar con una óptima eficiencia las necesidades hídricas del cultivo durante el período de máxima demanda, evitando al mismo tiempo la salinización del suelo por falta de lavado o la insuficiencia en el volumen de suelo humedecido por instalar un número equivocado de emisores ([Vargas, 2004](#)).

Este mismo autor afirma que para lograr un diseño apropiado, se debe prever en cada caso un número de emisores y un caudal de estos adecuado, determinado en función de las propiedades físicas del suelo y de la dosis de riego a aplicar, y asegura que la forma que presenten las zonas mojadas suministra elementos de juicio para elegir la disposición de emisores y laterales más correcta.

TABLA 1. Propiedades hidrofísicas del suelo. Fuente: Tarea Técnica

Textura	Cc (% V)	PMP (% V)	LSAD (mm)	LIAD (mm)	ADP (mm)	RFU (mm)
Arenoso	26	13	104	52	26	10

Cc- humedad a capacidad de campo expresada en % de volumen.

PMP- humedad al punto de marchitez permanente expresada en % de volumen.

LSAD y LIAD- láminas de agua correspondientes a los valores máximos (Cc) y mínimo (PMP) del agua disponible en el suelo, expresada en mm.

ADP- agua total disponible en el suelo para las plantas, expresada en mm.

RFU- reserva fácilmente utilizable por la planta equivalente a la norma neta parcial de riego, expresada en mm. La profundidad de humedecimiento considerada para estos cálculos es de 0,4 m y el criterio para definir el momento de riego durante la explotación es de 90% del valor de humedad a capacidad de campo.

La respuesta del cultivo a la aplicación del riego, así como otros criterios de tipo económico como el costo del agua, el valor de la cosecha, etc., son la base para decidir la eficiencia de aplicación. [Keller & Bliesner \(1990\)](#) resaltan que para la estimación de eficiencia de aplicación (Eap) hay que tener en cuenta el clima de la zona, y las posibilidades de considerar o no la precipitación efectiva para el cálculo de las necesidades netas (Nn) ([Schwartzman & Zur, 1986](#); [Ramírez & Sainz, 1997](#)).

Por otra parte, la tolerancia del cultivo a la salinidad y la calidad del agua de riego, pueden hacer incrementar las necesidades netas de riego con alguna fracción de lavado, esta cantidad deberá incrementarse con la eficiencia de aplicación para garantizar que las plantas que menos agua reciben, dispongan de suficiente cantidad para satisfacer las Necesidades totales de riego.

Para suministrar estas necesidades se pueden elegir varias combinaciones de dosis y frecuencias que se deberán tantear en unión del caudal de los emisores a fin de determinar qué número de ellos se necesitaría para conseguir el volumen de suelo adecuado ([Camp, 1998](#); [Kandelous & Šimůnek, 2010](#)). Una vez determinados todos estos valores se puede calcular el tiempo de riego, que es un parámetro definitorio en el diseño de la unidad operacional ([Bainbridge, 2001](#)). El diseño agronómico proporciona además los datos básicos para el diseño hidráulico ([Vargas, 2004](#)).

Variante 1: Diseño Agronómico según ([Arapa, 2002](#))

[Pizarro \(1996\)](#) asevera que, para garantizar un contenido de humedad del suelo correspondiente a los requerimientos hídricos del cultivo, es importante delimitar el valor del número de emisores (e) que garantiza el porcentaje mínimo de humectación (PH_{min}) alrededor del sistema radicular; y definir el volumen entregado por el emisor (Ve) y puesto a disposición de la planta muy cerca de esta zona (90%Prad ≤ Pb ≤ 120%Prad). Para determinar el diámetro del bulbo se utilizó la ecuación expresada por [Arapa \(2002\)](#) para suelos gruesos (arena) en función del caudal del emisor.

Cálculo del diámetro mojado [ϕ_{moj} (m)]

$$\phi_{moj} = 0.3 + 0,12 \times q \quad (1)$$

donde:

q- caudal que entrega el emisor en (L/h), una vez obtenido el diámetro mojado, se dividió el mismo entre 2 para obtener el radio del bulbo húmedo.

Cálculo de la superficie humedecida por el emisor [Ae (m²)]

$$A_e = \pi \times Re^2 \quad (2)$$

donde:

Re: radio que humedece el gotero (m), obtenido en el paso anterior.

Número mínimo de emisores por planta [e (u)] tr5

$$e \geq \frac{A_{mp} \times (PH_{min})}{(A_e \times 100)} \quad (3)$$

este valor garantiza que el porcentaje de superficie mojada de cada planta sea superior al mínimo establecido.

donde:

A_{mp}: área del marco de plantación (m²).

PH_{min}: Porcentaje de humedecimiento mínimo.

Tiempo de riego [T_R (h)]

$$\text{Irrigation time}[TR(h)] \cdot T_R = \frac{N_T}{e \times Q_e} \quad (4)$$

donde:

Q_e: Caudal que entrega un emisor.

N_T - Necesidades totales (mm/d), este valor se determinó por:

$$N_T = \frac{N_N}{cu \cdot (1 - k)} \quad (4.1)$$

donde:

Cu: coeficiente de uniformidad (%).

N_N: necesidades netas (mm/d), este valor se determinó por:

$$N_N = ETo \times Kc \times K_L \times K_{VC} \times K_a \quad (4.2)$$

donde:

ETo: Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).

Kc: Coeficiente de cultivo (adm).

Ka: Coeficiente de advección (adm), se asumió=1, hasta tanto se precise su valor para las condiciones de Cuba.

K_L: Coeficiente debido a la localización del riego (adm).

K_{vc}: coeficiente de variabilidad climática (adm), [Hernández \(1990\)](#) citado por [Pizarro \(1996\)](#), propone un valor entre (1,15-1,2).

K: Necesidades de lavado o posibles pérdidas por percolación, se determinó por:

$$K = 1 - Ef_{ap} \quad (4.3)$$

$$K = \frac{EC_{iw}}{2 \cdot EC_{se}} \quad (4.4)$$

donde:

CE_{ar}: Conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m).

CE_{es}: Conductividad eléctrica del estrato de saturación del suelo (dS/m).

De ambos valores calculados de (K) se escogió el mayor. Si las pérdidas por percolación son mayores que las necesidades de lavado, estas pérdidas provocarían un lavado superior al necesario, con lo que el nivel de salinidad se mantendría por debajo del mínimo. Sí por el contrario, las pérdidas son menores que las necesidades de lavado, habría que provocar voluntariamente una mayor percolación para evitar la salinización del suelo ([Pizarro, 1996](#)).

Cálculo de la dosis total [D_T (L)]

$$D_T = Tr_{\text{ajustado}} \times e \times Qe \quad (5)$$

Se utilizó como restricción de diseño la siguiente comparación:

$$Dt \geq Nt \quad (6)$$

Variante 2: Diseño Agronómico según Cruz-Bautista et al. (2015)

Se utilizó el mismo procedimiento de la variante 1, pero empleando para el cálculo del radio del bulbo húmedo, el criterio establecido por estos autores a partir del modelo experimental desarrollado. Cruz-Bautista et al. (2015) aseguran que conocer la distribución del agua bajo los emisores en los sistemas de riego por goteo es un requisito para su diseño y operación, ya que uno de los parámetros más importante en el diseño es la forma y el volumen del bulbo que se forma debajo de los emisores.

El volumen de suelo mojado representa la cantidad de agua almacenada en el suelo; mientras que su extensión, profundidad y diámetro deben tener en cuenta la profundidad del sistema radicular de la planta y con el espaciamiento entre emisores. De acuerdo con estos autores, el volumen de suelo mojado y su extensión es función de la textura y estructura del suelo, de la conductividad hidráulica saturada y el contenido de humedad inicial, además del caudal aplicado por el emisor (USDA, 2013).

Variables, como la posición relativa del emisor, cantidad y frecuencia de riego, cambios temporales y espaciales del contenido de humedad en el suelo, afectan la transferencia de humedad en el suelo. Cruz-Bautista et al. (2015) determinaron experimentalmente el radio del bulbo, para un caudal de (4 L/h) en suelo arenoso y obtuvieron un modelo experimental parte de estos resultados se muestran en la Figura (1).

Variante 3 de Diseño Agronómico según el procedimiento alternativo

Se emplea ante la imposibilidad de realizar las pruebas de campo, a pesar de ser el procedimiento más utilizado para el diseño de sistemas de riego por goteo en Cuba, no tiene en cuenta parámetros como; el

radio que humedece el emisor, la profundidad a la que se desarrolla el bulbo húmedo y el volumen de agua entregado por el emisor el cual se estima en función de satisfacer la demanda evapotranspirante sin tener en cuenta las necesidades de lavado, siendo el tiempo de aplicación el correspondiente para que se cumpla la condición anteriormente referida.

Los parámetros agronómicos que no se consideraron en este procedimiento, son necesarios para el análisis del complejo agua-suelo-planta, por lo tanto, no tenerlos en cuenta durante el diseño de los sistemas, seguramente conlleva a que la aplicación del agua de riego no se realice de manera adecuada para el cultivo, ya sea por exceso o por falta del líquido según Vargas-Rodríguez et al. (2021).

El número de emisores necesarios para satisfacer las necesidades totales de agua de la planta, se estima proporcionalmente al volumen necesario para satisfacer las necesidades de agua a lo largo de la hilera de plantas, a partir del caudal nominal del emisor y el número de plantas en la hilera. Previendo entregar el “volumen de agua necesario para cada planta”, en función de asumir la duración del riego conveniente para este propósito; contrario a como se realiza en las dos variantes anteriores, en las que la duración del riego se obtiene en función de las necesidades totales de agua, la relación suelo - planta y en consecuencia el caudal instalado por planta.

En esta variante, la duración y la frecuencia de riego se asumieron a conveniencia de la explotación, previendo que se cumpla (6), las necesidades de agua de la planta se mantienen: los parámetros N_N y N_T se obtuvieron de la misma forma que en las variantes 1 y 2, con la particularidad de que las necesidades de lavado (k) se calcularon solamente con la expresión (4.3), sin considerar el contenido de sales.

Como la dosis definitiva y la duración del riego se obtuvieron a partir del número de plantas a lo largo de la hilera y de las necesidades totales de agua de cada una, la longitud que alcanzó el lateral y la separación entre goteros a lo largo del mismo son parámetros importantes a considerar en el diseño, a partir de ellos es posible conocer el caudal que se entrega a toda la hilera de plantas.

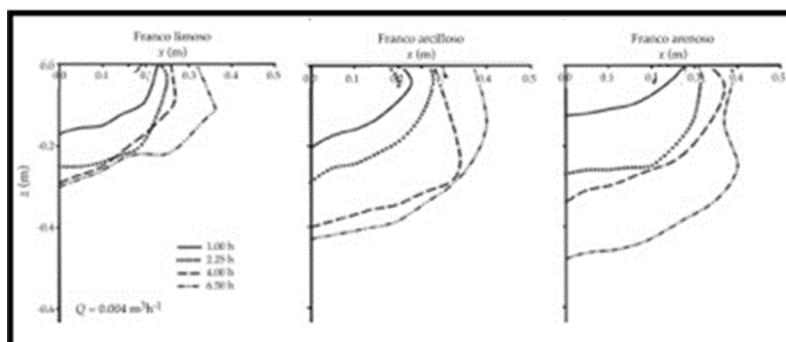


FIGURA 1. Avance del frente de humedecimiento (Cruz-Batista et al., 2015).

Esta variante se ha generalizado en la práctica del diseño en Cuba, ante las dificultades prácticas de realizar las pruebas de campo. Para hacer más válida la comparación entre las variantes, se mantuvieron los datos de partida iniciales y se asumió un total de 20 plantas por hilera y la separación entre emisores = 0.6 m; lo cual conllevó a aplicar en el lateral un volumen correspondiente a las necesidades totales de todas plantas de la hilera, para ello se utilizaron 101 emisores.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Diseño Agronómico del sistema de riego

Se comparan los resultados obtenidos en el diseño de cada variante (Tabla 2 y Figura 2), teniendo en cuenta datos correspondientes a pruebas de campo reales, los referidos en la tarea técnica y otros parámetros que han sido asumidos convenientemente por el autor. Esto conlleva a evaluar las ventajas e inconvenientes entre ellos, enfocadas principalmente en la gestión integrada y sostenible del agua de riego y la energía en tiempos de cambio climático.

La primera variante, desarrollada a partir del procedimiento propuesto por Arapa (2002), tiene su fundamento en la clasificación textural del suelo, en función de la cual se utiliza una ecuación para estimar el diámetro mojado por el gotero a partir del caudal que esta descarga. La segunda variante, utiliza el procedimiento anterior, pero el diámetro humedecido por el gotero se obtiene a partir del modelo experimental desarrollado por estos autores, específicamente representado para suelos de textura arcillosa en la Figura 1, donde se estima el desplazamiento vertical y horizontal del bulbo húmedo cuando se utilizan emisores de goteo en condiciones específicas.

También se consideró una tercera variante correspondiente al diseño alternativo, el cual no presenta muchas coincidencias con lo documentado con Pizarro (1996), justificado con la imposibilidad de realizar de pruebas de campo, así como, la carencia de softwares profesionales confeccionados para simular el comportamiento de la humedad debajo de los emisores, además de las dificultades para disponer de los datos de las propiedades hidrofísicas del suelo, necesarios para la corrida del Modelo, por

tanto prevalecen las dificultades técnicas para definir parámetros importantes y necesarios para realizar el dimensionamiento agronómico apropiado del sistema de riego.

Análisis de los resultados

Con respecto al radio de humedecimiento de los goteros (Re), según Arapa (2002) el valor obtenido es de 0.39 m, mayor que el obtenido en la variante 2. El primero es menos confiable que el segundo, ya que el cálculo de este parámetro se realizó a partir de 1, la cual tiene en cuenta la textura de suelo para un caudal en este caso = 4 L/h, conviene aclarar que la textura del suelo difícilmente sea un parámetro constante en toda la parcela, en el mejor de los casos pudiera asegurarse que será la que ocupa una mayor proporción dentro de la misma, es un hecho por lo tanto que dentro de una parcela la textura del suelo puede variar, lo mismo que la descarga del emisor.

En cambio en la segunda variante, el valor del radio de humedecimiento se obtiene a partir de un modelo experimental realizado a través de varias pruebas de campo en determinados períodos de tiempo donde se evalúa el comportamiento del movimiento vertical y horizontal del agua en el bulbo húmedo en determinadas texturas de suelos y determinados caudales lo que permite obtener un valor mucho más confiable, e incluso brinda la posibilidad de realizar el diseño previendo una separación entre emisores, diferente entre las distintas parcelas de riego.

En el tercer procedimiento no se tiene en cuenta el radio que humedece el emisor, lo cual introduce una inexactitud de los resultados haciendo poco confiable la separación entre emisores preestablecida (Se). Al no tener en cuenta (Re), el volumen o la superficie humedecida debajo del emisor, sigue siendo una incógnita durante el diseño, corriendo el riesgo de que la franja húmeda quede descolocada con relación a la raíz de las plantas, porque sea muy profunda (provocando pérdidas) o muy superficial (dejando de humedecer cierto número de raíces que pueden ser las más activas del cultivo), debilitando el anclaje de las plantas.

Por lo tanto, no tener en cuenta el radio del emisor conlleva a obtener un valor no confiable de la dosis total o definitiva. Otro elemento, que corrobora lo anterior, destaca en el hecho de fijar una separación

TABLA 2. Resultados del diseño agronómico en cada variante

Parámetros	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Radio de humedecimiento, [Re (m)]	0,39	0,35	-
Superficie humedecida, [Ae (m ²)]	0,478	0,384	-
Número de goteros por plantas, [e (u)]	6	7	≈ 5
Necesidades netas, [N _N (mm/d)]	3,30	3,30	3,30
Necesidades totales, N _T (L/d/p)	44,68	44,68	36,69
Tiempo de riego, T _R (h)	1,87	1,6	5,45
Dosis de riego, D _R (L)	44,88	44,88	36,91

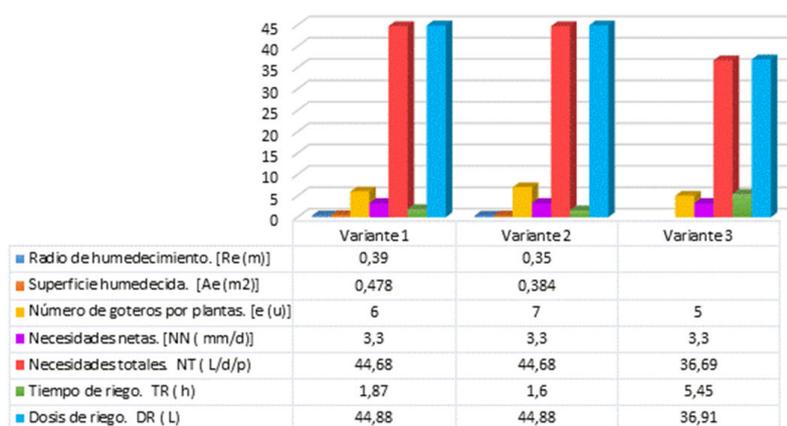


FIGURA 2. Resultados del diseño agronómico de las tres variantes.

entre emisores = 60 cm sin tener en cuenta todos los parámetros que intervienen en la forma y dimensiones del bulbo húmedo que se genera debajo de los emisores.

Para determinar la superficie mojada por emisor se debe tener en cuenta el volumen de suelo humedecido debajo del mismo, parámetro que es muy difícil de obtener, a menos que se estime experimentalmente, lo cual ya se ha comprobado que no resulta práctico a los efectos del diseño; para resolver esa dificultad, se introdujo el término área humedecida por el emisor la cual es menos exacta pero más fácil de obtener (Pizarro, 1996).

No obstante, los valores que se obtienen teniendo en cuenta el área de superficie humedecida son más válidos en cuanto más rigor presente las pruebas de campo. El procedimiento de la prueba de campo documentado por Pizarro (1996), seguidas por Arapa (2002) y otros autores como (Cisneros-Zayas *et al.* (2018) y tiene en cuenta la superficie humedecida en función de dos condiciones, el caudal del emisor y la textura del suelo y a través de esto se define un diámetro. En cambio, Cruz-Bautista *et al.* (2015) plantea que la superficie de humedecimiento debajo de un emisor depende de parámetros como: la cantidad de limo, la conductividad hidráulica del suelo, el tiempo de riego, la duración de las pruebas de campo y el caudal del emisor; por tanto, el valor obtenido por Cruz-Bautista *et al.* (2015) a pesar de referirse a la superficie humedecida y no al volumen, es más exacto porque tiene en cuenta más parámetros que consideran el desplazamiento horizontal y vertical del bulbo húmedo debajo de los emisores.

Es válido reiterar que, en el procedimiento alternativo, no se tienen en cuenta resultados de pruebas de campo y tampoco disponen con un modelo experimental o de otro tipo, siendo imposible de obtener el radio del emisor y por tanto obtener la superficie humedecida por el gotero. En la tarea técnica que aporta información sobre el caso de

estudio, se impone que los emisores están separados a una distancia ($S_e = 0,6m$) a lo largo del lateral con un criterio desconocido; si se supone que bajo esta condición el solapamiento entre los bulbos es mayor del 30%, no implica necesariamente que se aplique más agua al cultivo, esto pudiera provocar pérdidas por percolación profunda, sobre todo cuando el tiempo de riego se obtiene de un análisis aritmético, como es el caso.

El número de emisores por planta está en función de la profundidad del bulbo, el marco de plantación y el área mojada por el emisor, el cual debe garantizar un solape del 15- 30% del radio de humedecimiento, además depende del porcentaje de humedecimiento mínimo (PH_{MIN}). Este último parámetro es clave para satisfacer las necesidades de agua que necesita la planta para su correcto crecimiento y desarrollo, lo que demuestra que el procedimiento alternativo no es muy convincente.

Este procedimiento no tiene en cuenta este aspecto, el número de emisores con que se trabaja en el mismo se obtiene de dividir el caudal total necesario a aplicar en la hilera de plantas entre el caudal del emisor, sin dejar de tener en cuenta el tiempo necesario para aplicar dicho volumen de agua, esta cantidad de emisores viene sujeta a una separación entre emisores que en este caso aporta la tarea técnica. Por lo tanto, los resultados obtenidos no serán tan confiables como plantea Arapa (2002) y en mejor medida Cruz-Bautista *et al.* (2015) que tienen en cuenta el porcentaje de humedecimiento mínimo. El área de marco de plantación es un aspecto fundamental que tienen en cuenta estos autores, relacionado con el área vital del cultivo. Existe una relación entre la sombra que provoca el cultivo cuando recibe luz solar que condiciona el consumo del cultivo (área seca y área húmeda), (área con sombra y menos sombra), evaporación transpiración del cultivo todos estos elementos influyen en la cantidad de emisores que necesita una planta.

En el caso de las necesidades netas, en las tres variantes se emplea la misma ecuación; para estimar los valores se tomaron los datos que ofrece la tarea técnica.

Con relación a las necesidades totales, la práctica ha demostrado que, en varios casos, las dificultades para acceder a datos indicativos de contenidos de sales en el agua de riego o en el extracto acuoso del suelo, conllevan a utilizar como único criterio el aumento de (N_n) en una fracción equivalente a la eficiencia de riego para prever posibles pérdidas de agua por percolación profunda.

A pesar de que se asumieron los valores de calidad del agua y calidad del suelo tomando el agua de riego de salinidad media, previendo un nivel de salinidad en el suelo, este criterio es de mayor rigor que las pérdidas por percolación sobre todo en los sistemas de riego de alta frecuencia, es decir es más fácil la presencia de salinidad en el extracto acuoso del suelo que perdidas por percolación profunda; en el procedimiento alternativo se asume un criterio desconocido para determinar las pérdidas, pero no se tiene en cuenta las necesidades de lavado. En el método empleado por [Arapa \(2002\)](#) y [Cruz-Bautista et al. \(2015\)](#), el cálculo de las necesidades totales se realizó por medio de (4.1), se tuvo en cuenta la conductividad eléctrica del agua de riego (CEar) y el extracto de saturación del suelo (CEes).

El tiempo de riego T_r es uno de los parámetros más definitorios en el diseño agronómico de la instalación, su valor resultó muy similar en las dos primeras variantes, la diferencia se debe a que en la primera variante se necesita un emisor por planta menos que en la variante 2, esto se debe a que la superficie humedecida por el emisor obtenida por medio de (1) resultó mayor que la obtenida a partir del resultado de las experiencias de [Cruz-Bautista et al. \(2015\)](#); esta característica sustenta la primera conclusión de este trabajo.

Con relación a la tercera variante, la duración del riego resultó significativamente superior, el procedimiento para obtenerlo fue diferente; a partir de conocer N_T , se obtienen las necesidades de agua en toda la hilera, luego a partir de conocer el caudal de un emisor y la cantidad de estos ubicados a lo largo de la tubería lateral, se va incrementando la duración del riego hasta coincida el volumen de agua aplicado sobre la hilera de plantas con el volumen necesario para todas las plantas ubicadas en la hilera.

Como el cálculo de N_T en esta variante, no tuvo en cuenta las necesidades de lavado su valor resultó inferior al obtenido en las dos primeras variantes, por ello también resultó menor el número de emisores por planta correspondiente a la hilera; por tanto, la duración del riego resultará significativamente mayor en la tercera variante. Implicando una instalación más cara con relación al costo del bombeo y menos

confiable agronómicamente al entregar una dosis de riego menor que las variantes 1 y 2.

CONCLUSIONES

El procedimiento propuesto por [Arapa 2002](#) es válido solamente para un caudal del emisor = 4 L/h, a pesar de ser un valor utilizado con cierta frecuencia en la práctica del riego por goteo, no considera otros valores de descarga del emisor, ni la duración de la prueba, así como tampoco el avance vertical de la humedad debajo del emisor.

En ninguna de las tres variantes se tiene en cuenta el contenido de humedad o la tensión a la que esta es retenida en la zona húmeda debajo de los emisores, este parámetro resulta un elemento importante a prever durante el diseño agronómico, ya que garantiza una transferencia de humedad apropiada para las plantas.

Fijar una separación entre emisores a lo largo del lateral sin tener en cuenta la forma y dimensiones del bulbo húmedo que se genera debajo del emisor, no garantiza que se humedezca una superficie apropiada para el cultivo, tampoco es garantía de que se genere una franja de humedecimiento continuo que conlleve a la mejor transferencia de humedad para las plantas.

Los resultados destacan que la experiencia desarrollada por [Cruz-Batista et al. 2015](#), demuestran la validez de los modelos experimentales construidos a través de pruebas de campo para su utilización como herramientas confiables para el diseño agronómico de instalaciones de riego por goteo.

AGRADECIMIENTOS

Nos complace reconocer el apoyo técnico y logístico brindado por el grupo de investigadores del Proyecto de Investigación PS113LH001 032 Evaluación de la eficiencia en el uso del agua de riego en la Empresa Agrícola "Laguna Blanca", para el desarrollo de la investigación y las instalaciones para la edición y socialización de los resultados mostrados en este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.: *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Ed. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, vol. 298, Roma. Italia, 2006, ISBN: 92-5-304219-2.
- AMIN, M.; EKHMAJ, A.I.: "DIPAC-drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator", En: *7th International micro irrigation congress, 10-16 Sept. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 10-16, 2006.
- ARAPA, J.: *Manual de usuario. Aplicación y uso del software RIEGOLOC.*, 2002.

- ASABE: "Soil and Water Terminology", *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007.
- BAINBRIDGE, D.: "Buried clay pot irrigation: a little known but very efficient traditional method of irrigation", *Agricultural Water Management*, 48(2), 2001.
- CAMP, C.: "Subsurface Drip Irrigation: A review", *Transactions of the ASAE*, 41(5): 1353-1367, 1998.
- CISNEROS-ZAYAS, E.; ESPINOSA-VALDERA, A.; LÓPEZ SEIJAS, T.; YUMAR, J.: "Evaluación del riego localizado por goteo en condiciones de producción del sur de Güira de Melena", *Ingeniería Agrícola*, 8(4): 3-11, 2018, ISSN: 2227-8761.
- CRUZ-BAUTISTA, F.; ZERMEÑO-GONZÁLEZ, A.; ÁLVAREZ-REYNA, V.; CANO-RÍOS, P.; RIVERA-GONZÁLEZ, M.; SILLER-GONZÁLEZ, M.: "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, 2016, ISSN: 2007-2422.
- CRUZ-BAUTISTA, F.; ZERMEÑO-GONZÁLEZ, A.; AROSTEGUI SANCHEZ, V.; CANO-RÍOS, P.; RIVERA-GONZÁLEZ, M.; ADRIANA, M.M.: "Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo", *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4): 131-140, 2015, ISSN: 2007-2422.
- DORTA, A.: *Determinación del bulbo húmedo en Riego por Succión*, Universidad de Oriente, Tesis (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Santiago de Cuba, Publisher: Tesis (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Universidad de Oriente, 2017.
- ELMALOGLU, S.; DIAMANTOPOULOS, E.: "Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources", *Agricultural Water Management*, 96(11): 1587-1595, 2009, ISSN: 0378-3774.
- HERNÁNDEZ, A.: *Riego Localizado*, Inst. Curso Internacional de Riego Localizado en Tenerife, España, Tenerife, España, 1990.
- KANDELOUS, M.M.; ŠIMŮNEK, J.: "Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation", *Irrigation Science*, 28: 435-444, 2010, ISSN: 0342-7188.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D.: *Sprinkle and trickle irrigation*, Ed. Springer, vol. 3, vols. Issue: 5, New York: USA, 1990.
- NC ISO 8026: 2014: *Equipamiento de riego agrícola – aspersores. Requisitos generales y métodos de ensayo*, Inst. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba, NC ISO, La Habana, Cuba, Vig de 2014.
- PIZARRO, C.: *Riego localizado de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación*. 2da, Ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2da Edición ed., Madrid, España, 1990, ISBN: 84-7114-171-X.
- PIZARRO, C.F.: *Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, micro aspersión, exudación*, Ed. Mundi-Prensa, 3ra ed., Madrid, España, 1996.
- PIZARRO, F.: *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*, Ed. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, 2da Edición ed., Madrid, España, publisher: Madrid (Spain) Edit. Agrícola Espanola, 1985.
- RAMIREZ, B.; SAINZ, S.: "Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo", *Ingeniería del Agua*, 4(1): 57-70, 1997.
- REYES-REQUENA, R.; BAEZA-CANO, R.J.; ALFONSO-MARTÍNEZ, J.; CÁNOVAS-FERNÁNDEZ, G.; MORENO-PÉREZ, M.F.: "Evaluación hidráulica en laboratorio de goteros de bajo caudal usados en cultivos intensivos bajo plástico", *Ingeniería del agua*, 27(1): 1-12, 2023, ISSN: 1134-2196.
- SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B.: "Emitter spacing and geometry of wetted soil volume", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(3): 242-253, 1986, ISSN: 0733-9437.
- USDA: *Manual Nacional de Ingeniería de Riego. Capítulo 7.*, Ed. USDA, Departamento de Agricultura de Estados Unidos ed., USA, 2013.
- VARGAS, P.: *Algunas consideraciones para la asignatura métodos y técnicas de riego*, Inst. Universidad de Oriente, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, 2004.
- VARGAS-RODRÍGUEZ, P.; DORTA-ARMAIGNAC, A.; FERNÁNDEZ-HUNG, K.; MÉNDEZ-JOCIK, A.: "Considerations for the Rational Design of Drip Irrigation Systems", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(4): 32-45, 2021, ISSN: ISSN -1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- VIGOA-HERNÁNDEZ, R.R.: *Drenaje agrícola*, no. 9592580847, 2000.

Ernesto Javier Ortíz-Samprón, Estudiante, Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba.

Dayana Castañeda-Velázquez, Ing., Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba: e-mail: ernestojavier1600@nauta.cu.

Pável Vargas-Rodríguez, Dr.C., Profesor Titular, Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba: e-mail: pvargas@uo.edu.cu.

Alberto Méndez-Jocik, Dr.C., Jefe del Departamento de Diseño, Empresa de Proyectos Ingeniería, La Habana, Cuba, e-mail: joc4263@gmail.com.

Abel Dorta-Armaignac, Ing., Director Técnico, Empresa de Aprovechamiento Hidráulico. DPRH. Santiago de Cuba. Cuba. e-mail: abel.dorta@hidro.gob.cu.

Elio Quijala-Orti, MSc., Profesor Auxiliar, Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba: e-mail: elquiala@uo.edu.cu.