

Consideraciones sobre el uso de simplificaciones en el diseño agronómico de sistemas de riego localizado



<https://cu-id.com/2177/v33n1e03>

Considerations on the Use of Simplifications in the Agronomic Design of Localised Irrigation Systems

✉Pável Vargas-Rodríguez^{I*}, ✉Kaddiel Fernández-Hung^{II}, ✉Alberto Méndez-Jocik^{III},
✉Abel Dorta-Arnaiz^{IV}, ✉Rafael Miguel Pacheco Moya^I

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

^{II}Grupo de Difusión Tecnológica. Empresa de Cítricos Contramaestre. Santiago de Cuba. Cuba.

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

^{IV}Director Técnico. Empresa de Aprovechamiento Hidráulico. Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos Santiago de Cuba. Cuba.

RESUMEN: Durante el diseño agronómico de sistemas de riego por microaspersión es difícil garantizar humedecer un volumen de raíces que permita la apropiada extracción de agua y nutrientes, así como el anclaje adecuado. Esto conlleva a extremar la precisión en esta etapa, esencialmente, en la estimación de los coeficientes de cultivo K_C , de localización del riego K_L y de variabilidad Climática K_{VC} , así como de las necesidades de lavado LR . Cuando la estimación de éstos no se realiza de manera rigurosa, los resultados pueden afectar la eficacia del riego y la rentabilidad de la instalación. Identificar los efectos de las simplificaciones realizadas durante el diseño agronómico, en la precisión de los parámetros de explotación de la instalación, constituye una de las maneras de contribuir a la producción de alimentos agrícolas, considerando el uso racional y eficiente del agua. En la investigación se utilizó el procedimiento de diseño propuesto por Keller y Rodrigo/1979, se empleó además el método hipotético - deductivo, para evaluar los efectos de las simplificaciones en los parámetros de explotación de la instalación. Como resultado, se obtuvieron argumentos que permiten establecer los efectos de las simplificaciones en el rigor de los resultados del diseño agronómico de sistemas de riego localizado, los cuales permiten concluir que el diseño agronómico riguroso de sistemas de riego localizado con Microaspersores conlleva a establecer instalaciones eficaces.

Palabras clave: diseño agronómico, microaspersión, evapotranspiración, duración del riego, dosis de riego.

ABSTRACT: During the agronomic design of micro-sprinkling systems, it is difficult to guarantee the wetting of a volume of roots that allows the appropriate extraction of water and nutrients, as well as adequate anchorage. This leads to extreme precision at this stage, essentially in the estimation of crop coefficients K_C , irrigation location coefficient K_L and climatic variability coefficient K_{VC} , as well as leaching requirements LR . When these are not estimated in a rigorous manner, the results can affect irrigation efficiency and the profitability of the installation. Identifying the effects of simplifications made during agronomic design on the accuracy of the capability's operating parameters is one of the ways to contribute to agricultural food production, considering the rational and efficient use of water. The research used the design procedure proposed by Keller and Rodrigo/1979, and the hypothetical-deductive method was also used to evaluate the effects of simplifications in the operating parameters of the installation. As a result, arguments were obtained that allow establishing the effects of simplifications in the rigor of the results of the agronomic design of localized irrigation systems, which allow us to conclude that the rigorous agronomic design of localized irrigation systems with micro-sprinkling leads to establishing effective installations.

Keywords: Agronomic Design, Evapotranspiration, Micro-Sprinkling, Irrigation Timing, Irrigation Dose.

*Autor para correspondencia: Pável Vargas-Rodríguez, e-mail: pvargas@uo.edu.cu

Recibido: 10/05/2023

Aceptado: 09/12/2023

INTRODUCCIÓN

Rodrigo *et al.* (1997) aseguran que la clave para el diseño eficaz de un sistema de riego consiste en establecer de la forma más precisa posible, las prestaciones que posteriormente se exigirán de la instalación, así como el conocimiento de los parámetros implicados en el complejo agua-suelo-planta-clima, la topografía, las restricciones de diseño, los agregados de riego y otros. En el caso de los sistemas de riego localizado el agua se aplica con alta frecuencia, lo que permite mantener baja la salinidad en la solución acuosa del suelo y en niveles adecuados la capacidad de absorción de las raíces, por efecto de la localización del riego (Pizarro, 1996a & 1996b).

La evaporación en estas instalaciones es menor que en los sistemas de riego convencionales; en cambio, la transpiración aumenta ligeramente como consecuencia del efecto de la localización y del aumento de la radiación térmica al follaje del cultivo. Estas razones conllevan a que, en la práctica, se consideren unos coeficientes para diferenciar el diseño agronómico de los sistemas de riego localizado del que se realiza para otras técnicas de riego. Según Pizarro (1996a) & (1996b), la utilización de estos coeficientes conduce a que las necesidades de agua sean diferentes y no tenerlos en cuenta de manera precisa durante el diseño, conlleva a que la aplicación del agua no sea la adecuada, ya sea por exceso o por defecto.

En ocasiones se presentan dificultades para obtener la información necesaria para diseñar sistemas de riego localizado, habiéndose extendido la práctica poco rigurosa de incorporar simplificaciones durante el diseño agronómico. Los resultados que se derivan de estas simplificaciones pudieran afectar la eficiencia en el uso del agua de riego y de la energía asociada a esta, durante el manejo *a posteriori* de las instalaciones; esto propicia la utilización desmedida de recursos naturales deficitarios en el país. En este contexto surge la siguiente interrogante: ¿Cómo repercuten las simplificaciones durante el diseño agronómico de sistemas de riego localizado en la precisión de los parámetros de explotación que inciden en el uso racional del agua en estas instalaciones?

El objetivo del presente trabajo es establecer argumentos que permitan responder esta interrogante a partir de identificar, mediante la comparación de los resultados del cálculo de dos variantes de diseño, los efectos de las simplificaciones que se realizan durante el diseño agronómico de sistemas de riego localizado por microaspersión, en la precisión de los parámetros de explotación de una instalación de riego localizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Referentes de la investigación

El método FAO Penman-Monteith según Allen *et al.* (2006), representó un avance en el rigor de los

procedimientos para estimar las necesidades hídricas de los cultivos y en la actualidad, es el más utilizado por los especialistas en proyectos de riego de las Empresas de Proyectos de la Agricultura (ENPA). Recientemente éstos autores propusieron modificaciones que ofrecen resultados más precisos (Allen & Pereira, 2009). Cuando se diseñan sistemas de riego localizado, a estos les es inherente la alta frecuencia y pueden garantizar al cultivo un potencial hídrico en el suelo consecuente con su máximo consumo, sin provocar un incremento significativo de los costos de explotación, ni el deterioro de la estructura del suelo o daños al cultivo (Pizarro, 1996a & 1996b).

En la práctica del diseño se ha generalizado el uso de la evapotranspiración de referencia para el 10-20% de probabilidad de sobrepaso ($ET_{0,p}$), a partir de valores medios mensuales medidos en estaciones climatológicas durante 30 años o más. Este valor se corresponde con la lluvia del 90 - 80% de probabilidad, con lo que se cubrirían las demandas máximas del cultivo el 90-80% de los años. Esta práctica coincide con Jensen & Allen (2016), quienes proponen utilizar valores del 10 al 20% de probabilidad de excedencia para cultivos de alta demanda. No obstante, algunos diseñadores en Cuba utilizan la práctica dudosa de utilizar un valor representativo de ET_0 para cada provincia, sin considerar las condiciones climáticas locales.

Otros autores citados por Pizarro (1996a) & (1996b), plantean que cuando no es posible realizar el procesamiento estadístico, es apropiado considerar un coeficiente K_{VC} de variabilidad climática $1,15 \leq K_{VC} \leq 1,20$, para tener en cuenta el hecho de que los valores de evapotranspiración estimados corresponden a valores ya medidos y no a los máximos previstos durante el ciclo vegetativo, por lo que es necesario incrementar las necesidades de agua del cultivo para corregir las épocas deficitarias.

De acuerdo con Pizarro (1996a) & (1996b), el cálculo de ET_c no presenta grandes diferencias respecto a otras técnicas. Esta se calcula multiplicando el coeficiente de cultivo K_c y el valor de ET_0 a la probabilidad de diseño, el producto que resulta se corrige por un coeficiente debido a la localización del riego K_L , obteniendo así la evapotranspiración para Riego Localizado $ET_{c,RL}$.

K_L ha sido determinado por numerosos procedimientos que basan su cálculo en la fracción de la superficie sombreada por la cubierta vegetal respecto a la superficie total, al mediodía en el solsticio de verano. En la práctica se reconocen cuatro procedimientos y se recomienda aplicarlos todos, eliminar los dos valores extremos y utilizar la media de los dos valores más próximos, sin embargo, en Cuba solamente se ha adoptado uno solo de estos criterios como válido.

El coeficiente de cultivo K_c es básicamente el cociente entre ET_c y ET_o , y representa el efecto integrado de las características que diferencian a un cultivo particular del pasto de referencia. Así, cada cultivo tiene un valor diferente de K_c que varía principalmente en función de la etapa de crecimiento y en menor medida, con el clima. [Mahohoma \(2016\)](#) recopiló una amplia gama de coeficientes K_c para los cítricos y atribuyó esta dispersión a la diversidad de condiciones climáticas y a las características particularidades de las plantaciones, así como el espaciamiento entre árboles y su altura, la combinación patrón-cultivar, la cobertura del suelo, las prácticas de manejo, la técnica de riego y la frecuencia de humedecimiento.

A pesar de que los valores de K_c proporcionados por FAO-56 se pueden transferir entre regiones climáticas mediante ecuaciones de ajuste, presentan limitaciones para considerar la diversidad de condiciones entre parcelas diferentes. [Allen & Pereira \(2009\)](#) propusieron el enfoque de A&P para la estimación más precisa de K_c a partir de parámetros físicos de la plantación, pero [Taylor et al. \(2015\)](#) expuso la necesidad de precisar la influencia del control estomático que manifiestan los cítricos sobre dichos valores de K_c . En este sentido, [Pereira et al. \(2021\)](#) actualizaron el enfoque de A&P basados en los K_c resultantes de las investigaciones más relevantes, entre ellas las reseñadas por [Rallo et al. \(2021\)](#) para los cítricos. Recientemente, [Fernández-Hung et al. \(2022\)](#) calcularon los valores de K_c representativos de los cítricos para las condiciones de Cuba, a partir de la actualización del enfoque de A&P, los mismos son superiores a los adoptados en Cuba como referencia para el diseño $K_c = 0,75$.

Otra corrección se realiza por medio del coeficiente de advección K_{ADV} , el cual tiene en cuenta el efecto de los cultivos colindantes. En dependencia de la superficie que éstos ocupen, y de sus características relacionadas con la transmisión de humedad por medio de los vientos, pueden reducir las necesidades de agua de riego o incrementarlas, en caso de que los cultivos colindantes sean mayormente secos. Este coeficiente es muy difícil de estimar y en la práctica del diseño, es aceptado no considerarlo hasta tanto se precise su valor para condiciones específicas. $K_{ADV} = 1$.

Otra cuestión importante son las dimensiones del bulbo húmedo que generan los emisores debajo de las plantas y que permiten humedecer un volumen apropiado de raíces o, como se ha adoptado en la práctica, un porcentaje humedecido adecuado de la superficie vital del cultivo PH_r . En el caso de las técnicas que utilizan el aire para aplicar el agua a las plantas, su obtención en una primera estimación se puede realizar gráficamente, dibujando a escala la proyección horizontal de la copa del árbol atendiendo

a su diámetro, y en el mismo dibujo se indican las plantas aleaños en la misma hilera y, preferiblemente, las hileras adyacentes. También se indica el lateral de riego y su ubicación con relación a la hilera de plantas y sobre esta los emisores con sus respectivos bulbos de humedecimiento, también en proyección horizontal.

Luego de obtenida el área humedecida de varias plantas, se determina el área humedecida promedio por planta y se calcula el porcentaje que representa ésta, del total de área vital del cultivo PH_r . Desde el punto de vista del diseño interesa garantizar un porcentaje de humedecimiento igual o superior al mínimo establecido para cada cultivo $PH_r \geq PH_{MIN}$. La [Tabla 1](#) refiere valores aproximados de PH_{MIN} sugeridos por varios autores, para diferentes cultivos.

TABLA 1. Porcentaje de humedecimiento mínimo.

Autor	Descripción	$PH_{MIN}(\%)$
Torralba (1990)	Cítricos y Frutales	25-35
	Plátano	40-60
	Café	30-40
	Cultivos hortícolas	50-70
	Hidropónicos y macetas	100

Fuente: [Rodrigo et al. \(1997\)](#)

El parámetro PH_r es definitorio para el rendimiento de las cosechas y la rentabilidad de las instalaciones; por tanto, influye en el uso racional de los recursos hídricos y energéticos concebidos para cada instalación. No obstante, en realidad lo que interesa es el volumen de raíces efectivamente humedecido, es decir, aquel en el cual se garantiza un contenido de humedad en el suelo equivalente a la capacidad de campo.

En la práctica del diseño estos valores son muy difíciles de preestablecer, más por razones prácticas que técnicas, sobre todo para sistemas que utilizan emisores de goteo, aun cuando su estimación tiene un componente experimental importante, no se justifica que no se realice para la microaspersión. Sobre todo, si se tiene en cuenta que en la mayoría de los diseños se ignora el radio efectivo del emisor Re_{ef} , que permite obtener la separación efectiva entre ellos Se_{ef} para proporcionar el valor apropiado de PH_r . En la mayoría de los casos, el uso de aproximaciones al estimar este parámetro conlleva a dificultades para el buen funcionamiento de la instalación, tanto más, cuando el mismo no sea tenido en cuenta durante el diseño.

En esta etapa del diseño, también interviene el coeficiente de uniformidad CU , su valor no constituye un objetivo del diseño, sino que es una condición que se impone y que correlaciona factores constructivos e hidráulicos. Este se puede utilizar en la evaluación de instalaciones en funcionamiento y en el diseño de nuevos sistemas, para lo que es más exigente. El

procedimiento parte del cálculo de la tolerancia de presiones y caudales, de acuerdo con [USDA-NRCS \(2013\)](#); [Rodrigo et al. \(1997\)](#), definieron las razones que justifican el uso de este procedimiento:

1. El diámetro de salida (\varnothing_s) de los emisores es mucho menor que el de los utilizados en riego por aspersión, generalmente su valor oscila entre $0,8 \leq \varnothing_s \leq 1,2$ mm, esto implica que el riesgo de obturación es mucho mayor en los emisores de riego localizado.
2. No todos los emisores salen de la fábrica con el mismo \varnothing_s , debido al desgaste que experimentan los moldes durante el proceso de fabricación, este detalle afecta la uniformidad de entrega de los emisores en la parcela de riego, al considerar C_v y N_e , el factor constructivo se tiene en cuenta con mayor rigor en los sistemas de riego localizado.
3. La incidencia de los vientos en la forma y dimensiones de los bulbos húmedos que se generan, es significativamente menor, principalmente en las técnicas de goteo y exudación.

Asumir deliberadamente CU , o no tenerlo en cuenta para estimar las necesidades totales del cultivo, contribuye a perjudicar la respuesta productiva de los cultivos, ignorar el C_v puede conllevar a los mismos resultados. Durante el cálculo de las necesidades totales, en ocasiones se presentan dificultades para acceder a datos indicativos del contenido de sales en el agua de riego o en el extracto acuoso del suelo, esta dificultad ha conllevado a utilizar como criterio para incrementar las necesidades netas de agua N_n , una fracción equivalente a la eficiencia de riego para prever pérdidas de agua por percolación profunda, igual a como se procede en el diseño de sistemas de riego por aspersión. Sin embargo, no aplicar este criterio puede provocar afectaciones en las propiedades productivas de los suelos, y contribuir al deterioro acelerado de la instalación ([Tabla 2](#)).

Ubicación del área de estudio

El área se ubica en la Empresa Agropecuaria Jiguaní, en la región oriental de Cuba, aguas abajo de la confluencia con el río Contramaestre. Se localiza a 35 km al noreste de Bayamo, capital provincial de Granma, en las coordenadas geográficas $20^{\circ}31'25''$ de

latitud norte y $76^{\circ}20'24''$ de longitud oeste, en una altitud de 50 m.



FIGURA 1. Foto satelital del área de estudio.

Características edafoclimáticas

Según [Pérez et al. \(2012\)](#) y conforme con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo *WRB* (por sus siglas en inglés), el suelo clasifica como Calcaric Fluvisol, con texturas moderadamente finas. [Waller & Yitayew \(2016\)](#) refieren que sus principales propiedades hidrofísicas son:

1. Capacidad de retención (14 a 16% V).
2. Velocidad de infiltración final ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

Del mapa mundial de clasificación climática de *Köppen-Geiger*, se obtuvo que en la zona existe un clima ecuatorial de sabana con invierno seco Aw [Kottek et al. \(2006\)](#), y en el mapa de aridez de Cuba, se observó que en el área de estudio existe un régimen de aridez semihúmedo húmedo ([Vázquez et al., 2016](#)). Las principales variables climáticas se muestran en la [Tabla 3](#).

TABLA 3. Principales variables climáticas.

Lluvia media hiperanual (mm)	779
Velocidad media del viento (m/s)	1,2 - 2,5
Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)	22,3 - 26,5
Humedad relativa media mensual (%)	74,1 - 83,5

Fuente: [Fernández-Hung et al. \(2022\)](#)

Características del cultivo

El cultivo a beneficiar es toronja ‘Marsh Jibarito’ (*Citrus paradisi* Macfad.), injertado sobre naranjo agrio (*Citrus aurantium* L.). Las características que se prevén, para árboles de 10 años de plantado, tomado de la experiencia, se recogen en la [Tabla 4](#).

TABLA 2. Coeficientes de uniformidad de diseño recomendados.

Tipo de emisor	Espaciamento (m)	Topografía	Pendiente (%)	Rango de CU (%)
Fuente lineal en cultivos anuales y perennes	Todos	Uniforme	< 2	80 - 90
		Empinado u ondulado	> 2	70 - 85
Microaspersores	Todos	Uniforme	< 2	90 - 95
		Empinado u ondulado	> 2	80 - 90

Fuente: [USDA-NRCS \(2013\)](#)

TABLA 4. Características previstas del cultivo.

Marco de siembra (m × m)	6 × 4
Diámetro medio de la copa (m)	4,0
Altura media (m)	4,5
Profundidad de raíces activas (m)	0,6

Características de la fuente de abasto

El agua de riego se bombea desde el río Contra maestre, los valores de la conductividad eléctrica del agua de riego se obtuvieron de la serie 1991-2019 de valores medidos entre los meses de enero y abril. Sus valores más representativos se recogen en la [Tabla 5](#), incluido el que corresponde al 10% de probabilidad de sobrepaso.

TABLA 5. Valores de conductividad eléctrica del agua de riego.

CE_{ar} (dS m ⁻¹)	0,4 - 3,3
Promedio CE_{ar} (dS m ⁻¹)	1,0
D Estadístico CE_{ar} (dS m ⁻¹)	0,57
$CE_{ar10\%P}$ (dS m ⁻¹)	1,8

Fuente: [Redcal \(2019\)](#)

Características del microaspersor disponible

Las características técnicas del microaspersor utilizado se muestran en la [Tabla 6](#).

TABLA 6. Características del microaspersor ACUASMART 2002.

Presión de trabajo (kPa)	150 -400
Caudal (L/h ⁻¹)	20
Diámetro de humedecimiento (m)	3.0
Diámetro de la boquilla (mm)	0.84

Fuente: [NaanDanJain Ltd. \(2018\)](#)

Enfoque de cálculo

Los efectos que tienen las simplificaciones del diseño agronómico en los parámetros de explotación de sistemas de riego localizado, se determinaron a partir de la comparación de los resultados de dos variantes de cálculo en un proyecto de sistema de riego por microaspersión para las plantaciones de cítricos que se prevén fomentar en áreas de la Empresa Agropecuaria “Jiguaní”. En la variante A se incorporaron las simplificaciones del diseño agronómico que se han descrito inicialmente y la variante B se calculó conforme los procedimientos recogidos en la literatura técnica actualizada, sin el uso de las aproximaciones referidas durante el diseño.

Procedimiento para el diseño agronómico

Necesidades netas puntas [N_n (mm d⁻¹)]

Se calculó a partir de la expresión propuesta de [Rodrigo, \(1997\)](#):

$$N_n = ET_0 K_c K_L K_{VC} K_{ADV} \quad (1)$$

donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹).

K_c : Coeficiente de cultivo (adimensional).

K_L : Coeficiente de localización (adimensional).

K_{VC} : Coeficiente de variación climática (adimensional).

K_{ADV} : Coeficiente de advección (adimensional).

En la variante A se adoptó un valor de $ET_0 = 4$ mm día⁻¹. Para la variante B, dada la ausencia de datos confiables de radiación solar en estaciones agrometeorológicas cercanas y la simplicidad del método con relación al de FAO Penman-Monteith, el valor de ET_0 se calculó mediante la ecuación de [Hargreaves-Samani Paredes et al. \(2020\)](#), a partir de las series de datos climáticos obtenidos de la estación agrometeorológica de Contra maestre, y sus valores fueron procesados estadísticamente para obtener el del 10% de probabilidad de sobrepaso, por lo que en este caso $K_{VC} = 1$.

Para la variante A se tomó un valor único del coeficiente de cultivo, $K_c = 0,75$, sugerido por la Tarea Técnica de diseño y para la B, se adoptó el valor de $K_c = 0,93$ para el período punta [Fernández-Hung et al. \(2022\)](#), calculado según el enfoque de Allen y Pereira (A&P). Para obtener (K_L) se siguió el criterio de la fracción del área sombreada por el cultivo. Para la variante A se utilizó solamente a [\(2b\)](#) y para la variante B, se promediaron los dos valores resultantes intermedios.

$$K_L = 1,34 PC \quad (2a)$$

$$K_L = 0,1 + PC \quad (2b)$$

$$K_L = PC + 0,5 (1 - PC) \quad (2c)$$

$$K_L = PC + 0,15 (1 - PC) \quad (2d)$$

donde:

PC : es la fracción de área sombreada por el cultivo, la misma fue obtenida por la última de las igualdades que seguidamente se muestran.

$$PC = \frac{A_{PV}}{A_{MP}} = \frac{A_C}{A_{MP}} = \frac{S_P \phi_C}{A_{MP}}$$

A_{MP} : Es el área del marco de plantación (m²).

A_C : Es el área de raíces activas (m²). Se aplica en los casos de cultivos que no tienen copa definida y se puede determinar gráficamente en función del marco de plantación, la disposición de los emisores en relación con las plantas y el área humedecida por el emisor.

A_{PV} : Es el área de la proyección vertical de la copa del árbol medida a mediodía en el solsticio de verano (m²). Se aplica en los casos de cultivos que tienen

copa definida, su valor debe ser obtenido experimentalmente.

S_p : Separación entre plantas de una misma hilera (m).

\varnothing_C : Diámetro de la copa del árbol (m^2), se aplica con las mismas especificaciones que (A_{pv}).

Necesidades totales [Nt ($L\ p^{-1}d^{-1}$)]

Para la variante A no se tuvieron en cuenta las necesidades de lavado ($LR=K$) para incrementar las necesidades de agua del cultivo, solamente se tuvo en cuenta el riesgo de pérdidas por percolación a partir de la eficiencia de aplicación ($E_{AP} = 90\%$). Se tuvieron en cuenta las necesidades de lavado (K) para la variante B, ya que fue posible obtener la salinidad del agua de riego (CE_{ar}). La máxima conductividad eléctrica del extracto acuoso del suelo en la zona radicular, $máxCE_{es}$, que el cultivo tolera (100% de afectación del rendimiento) se estimó en $8\ dS\ m^{-1}$ (Zaman *et al.*, 2018).

$$Nt = \frac{Nn\ A_{MP}}{\frac{CU}{100} (1-K)} \quad (3a)$$

donde:

$$K = \max\left[\left(1 - \frac{E_{AP}}{100}\right), LR = \frac{CE_{ar}}{2máxCE_{es}}\right] \quad (3b)$$

Porcentaje de humedecimiento real [PH_R (%)]

$$PHr = \frac{Ah_R}{A_{MP}} 100 \geq PH_{Mín} \quad (4)$$

donde:

$PH_{Mín}$: Porcentaje de humedecimiento mínimo necesario para garantizar el desarrollo de las plantas, generalmente se asume a partir de investigaciones específicas, $PH_{Mín} = 35\%$ (Tabla 1).

A_{MP} : Área del marco de siembra de la planta (m^2).

Ah_R : Área realmente humedecida por planta (m^2), cuando se quiere lograr una franja de humedecimiento continuo se puede estimar por medio de:

$$Ah_R = Ne\ Ae \quad (5a)$$

$$Ae = \pi(1,1\ Re)^2 \left(\frac{\alpha}{360^\circ}\right) \quad (5b)$$

donde:

Ne : Número de emisores por planta (u).

Ae : Superficie que humedece un emisor (m^2).

Re : Radio de alcance del emisor (m). Algunos autores proponen incrementar este valor entre 10 y 15% según la textura del suelo, otros no prevén tal incremento para mantenerse del lado de la seguridad. De acuerdo con Vargas-Rodríguez *et al.* (2021) es más riguroso utilizar ($Re_{ef} = 1,1 (Re)$).

α : Ángulo de salida del difusor.

El valor de Ah_R se estimó gráficamente, teniendo en cuenta que la aplicación del riego se realiza a través de una franja de humedecimiento continuo, así como el

porcentaje que representa con relación al área del marco de plantación del cultivo A_{MP} . En (5a), no se incrementó el 10% del radio del emisor para calcular Ae , con lo que se estaría del lado de la seguridad. El parámetro PH_R se deberá comprobar gráficamente.

En los sistemas de riego localizado, la capacidad de almacenamiento del suelo no tiene una utilización relevante desde el punto de vista del diseño, debido a que la alta frecuencia típica de esta opción de riego conlleva a que se apliquen dosis pequeñas y como consecuencia el contenido de humedad en el suelo siempre está muy próximo a la capacidad de campo. Esta característica conduce a que no se aproveche en su totalidad la capacidad de almacenamiento del suelo y por tanto algunas propiedades hidrofísicas del suelo como la densidad aparente β , la capacidad de campo C_C , no tienen la misma utilidad que en el diseño de sistemas por aspersión y superficial.

Desde el punto de vista del diseño, la capacidad de almacenamiento del suelo M_N permite obtener la frecuencia de riego máxima que admite el suelo $IR_{Máx}$. No obstante, como regla general los sistemas de riego localizado se diseñan para frecuencias diarias de aplicación, por ello, el cálculo y la elección del Intervalo de Riego puede considerarse un paso formal del diseño para establecer un valor umbral por encima del cual no es factible espaciar un riego del otro. La práctica ha demostrado que es viable diseñar para una frecuencia diaria, por las facilidades que representa para lograr un régimen de humedad en el suelo que propicie los mejores rendimientos de los cultivos.

Tiempo de riego [TR (h)]

$$Tr = \frac{Nds\ Nt\ IR}{Ndr\ Qp} \quad (6)$$

donde:

Nds : Es el número de días de la semana (d).

Ndr : Es el número de días disponibles para el riego en la semana (d).

IR : Frecuencia de riego (d). $IR = 1\ d$.

Qp : Es el caudal instalado por planta ($L \cdot h^{-1} \cdot p^{-1}$) y se calcula en dependencia la disposición de la tubería lateral y los emisores con respecto a la hilera de plantas. Para el caso de franja de humedecimiento continuo:

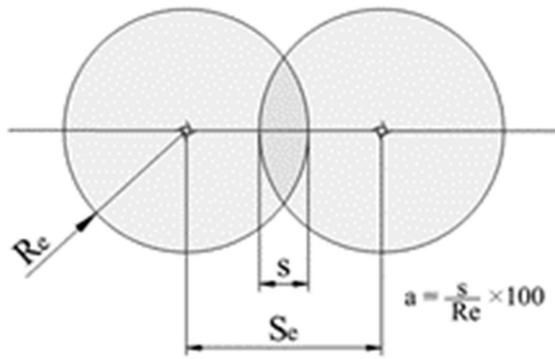
$$Qp = \frac{Qe\ Ah_R}{Ae} = Qe\ Ne \quad (6a)$$

donde Qe es el caudal medio del emisor ($L \cdot h^{-1}$) correspondiente a la presión de trabajo y que garantiza el valor Ae .

La solución analítica de (Qp) no debe perder de vista el sentido práctico de la solución gráfica anteriormente referida para estimar PH_R . Al ubicar con una equidistancia (Se), los emisores a lo largo de la tubería lateral y verificar su posición con respecto a las plantas, se obtuvieron criterios válidos para estimar el número de emisores que humedece una misma planta y comprobar su valor, obtenido por medio de (6a).

$$Se = Re \left(2 - \frac{a}{100} \right) \quad (6b)$$

$$I_{AP} = \frac{Qe}{Ae} \quad (8)$$



Fuente: Pizarro (1996a) & (1996b).

FIGURA 2. Representación gráfica de (Se).

El cociente (N_{ds}/N_{dr}) se justifica porque en muchas explotaciones se prevé un día de la semana en el cual no se aplica el riego y se planifican labores de mantenimiento del sistema y agrotécnicas para el cultivo; esto se realiza con la intención de repartir la dosis de riego de ese día entre los seis restantes días de la semana, considerando que la frecuencia de riego es diaria. Estas razones justifican además el hecho de aproximar la duración del riego diario por exceso a razón de $\frac{1}{4}$ h, lo cual facilita además la utilización de relojes mecánicos para el manejo del riego. Al prolongar el gráfico de la figura anterior a lo largo de la hilera de plantas, se pueden identificar los patrones de humedecimiento más representativos en el lateral de riego y verificar la posición que cada emisor ocupa con relación a las plantas.

Dosis total [Dt (L p⁻¹d⁻¹)]

$$Dt = \frac{\text{Trajustado } Qp \text{ } Ndr}{I_{Rreal} \text{ } Nds} \quad (7)$$

Luego de obtener la dosis de riego se comprobó que la misma satisface las necesidades totales de agua de la planta ($D_i \geq N_i$) y también que la intensidad media de aplicación del emisor elegido no sobrepasa la velocidad de infiltración estabilizada del suelo para el tiempo estimado ($I_{AP} \leq V_{INF}$).

Investigaciones específicas han demostrado que en los sistemas de riego localizado la intensidad de aplicación al inicio del riego es superior a la velocidad de infiltración estabilizada del suelo, pero a medida que tiene lugar el movimiento del agua en el suelo, la superficie humedecida por el emisor aumenta considerablemente invirtiéndose la situación anterior hasta lograr el volumen de agua previsto a aplicar durante el diseño. Si esto no se cumpliera, se debe reconsiderar la elección del emisor o su presión de trabajo, otra alternativa sería aplicar el riego a pulsos, asumiendo para ello el uso de ciertos automatismos Allen & Pereira (2009). Para la determinación de la intensidad de aplicación [I_{AP} (mm h⁻¹)] se aplicó la siguiente expresión:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño agronómico

Los resultados del diseño agronómico se obtuvieron a partir de los procedimientos anteriores, la tabla que le sigue se muestran los principales resultados de la comparación, los mismos corroboran cómo la utilización o no de determinados coeficientes y parámetros puede conllevar a dos instalaciones con prestaciones diferentes en un mismo escenario edafoclimático y de cultivo, y para un mismo emisor.

TABLA 8. Resultados del diseño agronómico.

Parámetros de diseño	Variantes	
	A	B
Necesidades netas puntas (mm·d ⁻¹)	2,7	3,6
Necesidades totales (L·p ⁻¹ ·d ⁻¹)	79,2	108,0
Porcentaje de humedecimiento real (%)	46	46
Frecuencia de riego (d)	1	1
Tiempo de riego (h)	3,0	4,25
Dosis de riego (L·p ⁻¹ ·d ⁻¹)	80,0	113,3

Análisis de los resultados

Las necesidades de agua en la variante B resultaron superiores que en la variante A, en esta última se ha diseñado una instalación probablemente con menor costo de inversión inicial, pero limitada agronómicamente y por lo tanto con restricciones para funcionar en condiciones más exigentes; las mismas pueden manifestarse con el incremento de sales en la solución del suelo y/o en el agua de riego. Esto constituye un riesgo real en las instalaciones de riego con deficiencias o ausencia de sistemas de drenaje.

También influyó el hecho de que solamente se tuvo en cuenta el criterio de Decroix, citado por Pizarro (1996a), para estimar el coeficiente de localización del riego $K_L = 0,77$, en lugar de utilizar el valor promedio de los resultados más próximos, de la manera que se concibió en la variante B donde $K_L = 0,74$. Por otro lado, el coeficiente de cultivo se tomó $K_C = 0,75$ para la variante A, valor sugerido en la Tarea Técnica de proyección y no se tuvo en cuenta para su estimación propuestas más actualizadas (Fernández-Hung et al., 2022). Estos últimos investigadores obtuvieron $K_C = 0,93$ para las condiciones del área de estudio y árboles altos, sembrados con alta densidad de plantación.

En la variante A, el valor probable más crítico utilizada para el diseño fue $ET_0 = 4$ mm/d, valor sugerido en la Tarea Técnica, no se obtuvo a partir de un procedimiento estadístico para el análisis de los datos, su ajuste se realizó asumiendo el coeficiente de corrección por variabilidad climática ($K_{VC} = 1,175$), esto conllevó a que las necesidades netas estimadas

para el período de máxima demanda del cultivo, $N_n = 2,7 \text{ mm d}^{-1}$, en lugar de $N_n = 3,6 \text{ mm d}^{-1}$ obtenidas para la variante B que resultó un valor más flexible ante posibles alteraciones climáticas y operacionales más exigentes.

En la variante A, las necesidades de lavado no se tuvieron en cuenta y N_i se incrementó a partir de la eficiencia de aplicación ($E_{AP} = 90\%$) y con ello, el denominador de (3) resulta de 81% (similar al valor de eficiencia de riego que se utiliza en el diseño de la mayoría de las técnicas de riego por aspersión). Contrariamente, en la variante B, N_i se incrementa con la fracción para el lavado, obtenida a partir de (4), donde la conductividad eléctrica del agua de riego $CE_{ar} = 1,8 \text{ dS/m}$ y en el extracto acuoso del suelo $máxCE_{es} = 8 \text{ dS/m}$.

En ambas variantes el porcentaje de superficie humedecida supera el mínimo previsto, a pesar de que lo que interesa en realidad es el volumen de raíces humedecido. Esta cuestión no queda debidamente asegurada por el inconveniente anteriormente mencionado de no realizar las pruebas de campo previo al diseño de las instalaciones, impidiendo asegurar este objetivo durante la etapa de diseño.

Es importante realizar el procedimiento gráfico descrito anteriormente, la Figura 3 muestra la distribución de los patrones de humedad a lo largo de la hilera de plantas, útil para estimar PH_R y verificar Ne en el caso de estudio. Esto que supuestamente queda resuelto al garantizar una superficie mínima humedecida del área vital de la planta, puede conllevar a aplicar volúmenes de agua superiores a las necesidades totales, ya que como se ha especificado anteriormente, debajo de éstas, el volumen de raíces humedecido es mucho mayor al estar concentradas en la zona húmeda y de esta forma la aplicación del riego podría resultar más costosa cuando la superficie humedecida es exageradamente mayor. Tampoco es posible asegurar durante el diseño, que el contenido de humedad debajo de las plantas sea igual o ligeramente superior que el correspondiente a la capacidad de campo del suelo, de no resultar así, existiría una disminución de los rendimientos y de la rentabilidad de la instalación.

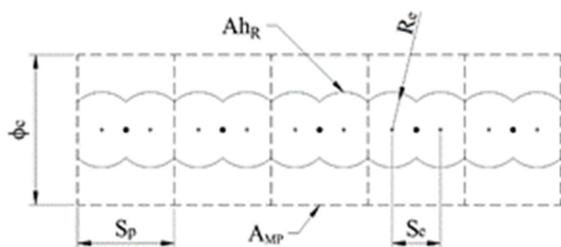


FIGURA 3. Patrones de humedad a lo largo de una hilera de plantas.

No obstante, está comprobado que el volumen de suelo humedecido debajo de los emisores es superior al volumen humedecido que se acumula en la superficie. El hecho de prever más del 35% de superficie humedecida, como se aprecia en la Tabla 6, ofrece una garantía de humedecer el volumen de raíces apropiado debajo de los emisores.

La no realización de las pruebas de campo infiere otra simplificación del diseño que puede conllevar a modificar los parámetros de explotación de las instalaciones. Los efectos de esta simplificación son válidos para las dos variantes, aunque sus repercusiones son más perjudiciales en la variante A. De acuerdo con Vargas-Rodríguez et al. (2021), esta situación se agrava en las técnicas de riego por goteo y por exudación.

En la variante A, la duración del riego es de 3 h, y las unidades rotacionales podrán agrupar más parcelas que en la variante B, en la cual se necesitan más de 4,25 h para aplicar la dosis necesaria. Esto que en principio parecería una ventaja de la variante A, podría no resultar igual cuando se concibe el esquema hidráulico de la instalación y el diseño hidráulico de la misma; ya que asimilar esa ventaja implicaría mayores longitudes y diámetros de tuberías para poder llevar el agua hasta las parcelas ubicadas en los extremos de la instalación, las pérdidas de energía serían superiores y por lo tanto también lo serán las prestaciones necesarias en la instalación de bombeo.

La variante A despunta como una instalación con menor costo de inversión inicial, pero esto no es definitivo, la práctica del diseño ha demostrado que, lo que representa un ahorro en la etapa de diseño agronómico puede resultar lo contrario en la etapa del diseño hidráulico y la instalación continuaría siendo agronómicamente restringida y con limitaciones para funcionar en condiciones más exigentes.

CONCLUSIONES

La falta de rigor en la adquisición y la utilización de los datos básicos para realizar el diseño agronómico de sistemas de riego por microaspersión, conlleva a instalaciones con limitaciones para funcionar en condiciones más exigentes.

Una de las simplificaciones más generalizadas de procedimiento de diseño agronómico, es la relacionada con las necesidades de lavado, no tener en cuenta este parámetro puede provocar la acumulación peligrosa de sales en la solución del suelo, la disminución de los rendimientos del cultivo y el posterior deterioro del suelo.

La aplicación de simplificaciones en la etapa del diseño agronómico de la instalación, no conduce necesariamente a esquemas hidráulicos más flexibles y económicos, y los parámetros de bombeo pueden resultar más exigentes.

A pesar de que el volumen de raíces humedecido tiende a ser suficiente cuando la superficie humedecida por el emisor supera el mínimo establecido, las pruebas de campo resultan más confiables en los sistemas de riego por microaspersión, ya que permiten verificar el contenido de humedad debajo de los emisores y el radio de humedecimiento realmente efectivo de éstos.

AGRADECIMIENTOS

Nos complace reconocer el apoyo logístico ofrecido por el "Proyecto VLIR – UO (P1), para el desarrollo de la Investigación y las facilidades para la edición y socialización de los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.: "Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height", *Irrigation Science*, 28: 17-34, Publisher: Springer, 2009, ISSN: 0342-7188.
- 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. Food & Agriculture Org., vol. 56, Roma. Italy, 298 p., 2006, ISBN: 92-5-304219-2.
- FERNÁNDEZ-HUNG, K.; VARGAS-RODRÍGUEZ, P.; CUETO, J.R.; BROWN-MANRIQUE, O.: "Water requirements of new citrus orchards in "Jiguaní" Agricultural Enterprise", *INGE CUC*, 18(1): 95-104, Publisher: Corporación Universidad de la Costa, 2022, ISSN: 2382-4700.
- JENSEN, M.E.; ALLEN, R.G.: *Evaporation, evapotranspiration and irrigation water requirements*, Inst. American Society of Civil Engineering, Reston, Virginia, USA, 2016.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F.: "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated," *Meteorol. Z.*, 15(3): 259-263, 2006.
- MAHOHOMA, W.: *Measurement and modelling of water use of citrus orchards*, Inst. University of Pretoria, South Africa, Pretoria, South Africa, Publisher: University of Pretoria p., publisher: University of Pretoria, 2016.
- NAANDANJAIN LTD: *Microaspersores*, NaanDanJain Ltd, 2018.
- PAREDES, P.; PEREIRA, L.; ALMOROX, J.; DAROUICH, H.: "Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargeaves-Samani equation using local climatic variables", *Agricultural Water Management*, 240: 106-210, Publisher: Elsevier, 2020, ISSN: 0378-3774.
- PEREIRA, L.; PAREDES, P.; MELTON, F.; JOHNSON, L.; MOTA, M.; WANG, T.: "Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height: Practical application to vegetable, field and fruit crops with focus on parameterization", *Agricultural Water Management*, 252: 106-663, Publisher: Elsevier, 2021, ISSN: 0378-3774.
- PÉREZ, J.; HERNÁNDEZ, A.; BOSCH, D.; MARSÁN, R.; MUNÍZ, O.; FUENTES, E.: *Mapa de suelos de la República de Cuba*, Inst. Instituto de Suelos, La Habana, La Habana, Cuba, 2012.
- PIZARRO, C.F.: *Sistemas de riego localizado de alta frecuencia (Goteo, Micro aspersión y Exudación)*, Ed. Mundiprensa, 2da ed., Madrid, España, 1996a, ISBN: 84-7114-610-X.
- PIZARRO, F.: *Riegos Localizados de alta Frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación. rev. ampl.*, Ed. Mundi Prensa, 3ra. ed., Madrid, España, 513 p., 1996b, ISBN: 84-7114-610-X.
- RALLO, G.; PAÇO, T.; PAREDES, P.; PUIG-SIRERA, À.; MASSAI, R.; PROVENZANO, G.; PEREIRA, L.: "Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops", *Agricultural Water Management*, 250: 106-645, Publisher: Elsevier, 2021, ISSN: 0378-3774.
- REDCAL: *Base de Datos de Calidad del Agua*, Inst. Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, Granma, Cuba, 2019.
- RODRIGO, L.J.; HERNÁNDEZ, A.J.M.; PÉREZ, R.A.; GONZÁLEZ, H.J.F.: *Riego Localizado*, Ed. Ediciones Mundi-Prensa, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación ed., Madrid, España, 405 p., 1997.
- TAYLOR, N.; ANNANDALE, J.G.; VAHRMEIJER, J.; NA IBRAIMO; MAHOHOMA, W.; GUSH, M.; ALLEN, R.: "Modelling water use of subtropical fruit crops: The challenges", En: *X International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management 1160*, pp. 277-284, 2015, ISBN: 94-6261-156-4.
- USDA-NRCS.: *Microirrigation*, Ed. National Engineering Handbook, Irrigation, USDA ed., Washington, D.C, 623 p., 2013.
- VARGAS-RODRÍGUEZ, P.; DORTA-ARMAIGNAC, A.; FERNÁNDEZ-HUNG, K.; MÉNDEZ-JOCIK, A.: "Consideraciones para el diseño racional de sistemas de riego por goteo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(4): 32-45, Publisher: Universidad Agraria de La Habana, 2021, ISSN: 2071-0054.
- VÁZQUEZ, R.; FERNÁNDEZ, A.; SOLANO, O.; LAPINEL, B.; RODRÍGUEZ, F.: "Mapa de aridez de Cuba", *Zonas áridas*, 11(1): 101-109, 2016, ISSN: 1814-8921.
- WALLER, P.; YITAYEW, M.: *Irrigation and Drainage Engineering*, Ed. Springer publication, Switzerland, 742, Publisher: Springer Publication p., 2016, ISBN: 3-319-05698-0.

ZAMAN, M.; SHAHID, S.A.; HENG, L.: *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*, Ed. Springer

Nature, Switzerland Springer+ International Atomic Energy Agency ed., Switzerland, 164 p., 2018, ISBN: 3-319-96190-X.

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

Kaddiel Fernández-Hung, MSc., Especialista Grupo de Difusión Tecnológica Empresa de Cítricos Contracestros, Santiago de Cuba: e-mail: opp1@geditec.co.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., Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. e-mail: abel.dorta@hidro.gob.cu

Rafael Miguel Pacheco-Moya, MSc., Profesor Auxiliar. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba (Cuba). rpacheco@uo.edu.cu

FINANCIAMIENTO: Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación “Proyecto VLIR – UO, (P1): “Valorización de los servicios científicos y ambientales para la mitigación del estrés climático en el oriente de Cuba”, financiado por el Consejo Universitario Flamenco de Bélgica.

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

CONTRIBUCIONES DE AUTORES: **Conceptualización:** P. Vargas. **Curación de datos:** K. Fernández. P. Vargas. **Análisis formal:** P. Vargas. K. Fernández. A. Méndez. **Investigación:** K. Fernández. P. Vargas. A. Méndez. A. Dorta. R. Pacheco. **Metodología:** K. Fernández. P. Vargas. A. Méndez. A. Dorta. R. Pacheco. **Supervisión:** P. Vargas. K. Fernández. A. **Redacción, borrador original:** P. Vargas. K. Fernández. **Redacción, revisión y edición:** P. Vargas. K. Fernández.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

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