



<https://eqrcode.co/a/k4IUy>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

# Considerations for the Rational Design of Drip Irrigation Systems

## *Consideraciones para el diseño racional de sistemas de riego por goteo*

Dr.C. Pável Vargas-Rodríguez<sup>II</sup>, Ing. Abel Dorta-Armaignac<sup>I</sup>, MSc. Kaddiel Fernández-Hung<sup>II</sup>,  
Dr.C. Alberto Méndez-Jocik<sup>III</sup>

<sup>I</sup>Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba.

<sup>II</sup>Grupo de Difusión Tecnológica Empresa de Cítricos Contramaestre. Santiago de Cuba, Cuba.

<sup>III</sup>Empresa Nacional de Proyectos Ingeniería, Departamento de Diseño, La Habana, Cuba.

**ABSTRACT.** Now a day, drip irrigation systems are buying with the emitters “already” inserted, and introduced in Agricultural farms considering some selection criteria. Based on the data corresponding to real field tests and assuming other suitable parameters, paperwork contribute arguments to bear the obtaining of a rational procedure for the agronomic design of drip irrigation systems. That considers the wetted volume on the root zone as well the depth of the wet bulb according to the root zone of crops and the humidity tension in the soil under the emitters. Particularities of different procedures are showing used for the design of these systems. As a result the convenience is demonstrated of combining the procedures that use the results of the field tests, appropriately the optimal irrigation point and the software that simulate the distribution of the humidity under the emitters, to get a rigorous procedure for the design.

**Keywords:** Drip irrigation, Effective radius, Wet bulb, Moisture Tension.

**RESUMEN.** Actualmente se están importando sistemas de riego por goteo con los emisores “ya” insertados, para ser introducidos en Empresas Agropecuarias bajo determinados criterios de selección. Partiendo de datos correspondientes a ensayos de campo reales y otros parámetros convenientemente asumidos, el trabajo aporta elementos que conllevan a establecer un procedimiento racional para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo, que considere el volumen de raíces humedecido, la profundidad del bulbo de humedecimiento con relación a la zona radicular del cultivo y la tensión de humedad en la zona húmeda que generan los emisores. Se resaltan dos maneras para abordar el diseño y se demuestra la conveniencia de combinar los procedimientos que utilizan los resultados de las pruebas de campo, el momento óptimo para el riego y los softwares que simulan la distribución de humedad debajo del emisor, para establecer un procedimiento que propicie mayor rigor en el diseño.

**Palabras clave:** riego por goteo, radio efectivo, bulbo húmedo, tensión de humedad.

### INTRODUCTION

Moistened root volume constitutes an important parameter for the design of drip irrigation systems, it is necessary to favours the extraction of water and nutrients by the plants as well as their anchoring in the soil. However, in practice, the use of the surface moistened by the emit-

### INTRODUCCIÓN

Durante el diseño de sistemas de riego por goteo, es importante 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, sin embargo en la práctica, se ha generalizado el uso de la superficie humedecida por el emisor, que es un parámetro

Author for correspondence: Pavel Vargas-Rodríguez, e-mail: [pvargas@uo.edu.cu](mailto:pvargas@uo.edu.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3316-0898>

Received: 02/03/2021.

Approved: 20/09/2021.

ter is preferable, because is an easier parameter to obtain but less exact, which allows an approximate estimate of the number of emitters per plant. This situation currently continues to be a pending issue as regards design of drip irrigation systems.

In this context, a considerable number of drip irrigation systems are being imported with the emitters "already" inserted, to be introduced in Cuban agricultural companies under certain selection criteria. Some criteria that lead to establishing a rational design of these irrigation systems are provided in this research, justified because the currently design procedures used, do not consider the shape and dimensions of the wet bulb generated by these emitters, either the depth of the wet bulb in relation to the vital area of the plants. They also do not consider how the humidity tension behaves in the humid zone under the emitters.

These parameters are part of the water-soil-plant-climate complex. Not taking them into account in the design, surely leads to the application of irrigation not being carried out properly, either due to excess or lack of irrigation water, since all the Soils do not retain moisture content with the same energy, neither do all plants have the same resistance to drought Rodrigo López cited by Selléz & Ferreira (2002).

The results corroborate the relevance of field tests as a preliminary step to design drip irrigation systems, besides they show that the most appropriate procedure is deduced from a combined use of this one, with the procedure that consider the optimal moment of irrigation. Both supported by a model that allows simulating the vertical and horizontal advance of the humid areas generated by the emitters, all these with the purpose to obtain greater speed and rigor in the design.

## MATERIALS AND METHODS

Starting from data corresponding to real field tests and other suitably assumed parameters, this section compares the results of two procedures for design. These allow assessing different advantages and disadvantages among them, fundamentally focused on the rational use of water and energy face to Climate Change.

### Data used to develop the procedures

The study is developed in a gross area of 7.56 ha, four rectangular irrigation plots of (80 m × 200 m), located in pairs on both sides of the control station, placed in Los Milian farm on the Ciego de Ávila province, between coordinates 736039 North y 229762 East. Pumping installation will be concentrated together with the filtering system to facilitate the automation of irrigation. The irrigation plots will be 10 m apart to facilitate the construction of the drainage system and the harvesting work. A perimeter road was assumed of 5 m.

The supply source is a single well, with a flow authorized to extract enough to irrigate the proposed crop. CU = 90 %, will be assumed, flat relief and horizontal design slope are

más fácil de obtener pero menos exacto, el cual permite estimar de manera aproximada el número de emisores por planta, esta situación en la actualidad continua siendo una asignatura pendiente en lo que se refiere al diseño de las instalaciones.

En este contexto, se están importando una cantidad considerable de sistemas de riego por goteo con los emisores "ya" insertados, para ser introducidos en Empresas Agropecuarias cubanas bajo determinados criterios de selección. La presente investigación aporta elementos que conllevan a establecer un procedimiento de diseño racional de estos sistemas de riego, justificado en el hecho de que los procedimientos de diseño utilizados en la actualidad no tienen en cuenta la forma y dimensiones del bulbo húmedo que generan estos emisores, ni la profundidad del mismo con relación a la zona de ramificación densa de las plantas; tampoco consideran como se comporta la tensión de humedad en la zona húmeda del suelo.

Estos elementos son parte del complejo agua-suelo-planta-clima, no tenerlos en cuenta en el diseño, seguramente conlleva a que la aplicación del riego no se realice adecuadamente, ya sea por exceso o por falta del preciado líquido, ya que todos los suelos no retienen los contenidos de humedad con la misma energía, ni todas las plantas tienen la misma resistencia a la sequía, Rodrigo López citado por Selléz & Ferreira (2002).

Los resultados corroboran la pertinencia de las pruebas de campo como paso previo para diseñar sistemas de riego por goteo, pero al mismo tiempo demuestran que el procedimiento más apropiado se deduce de una utilización combinada del mismo, con el procedimiento que tiene en cuenta el momento óptimo de riego. Apoyados ambos en un modelo que permita simular el avance vertical y horizontal de las zonas húmedas que generan los emisores, todo ello, con el propósito de lograr mayor rapidez y rigor en el diseño.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Partiendo de datos correspondientes a ensayos de campo reales y otros parámetros convenientemente asumidos, en este epígrafe se comparan los resultados de dos procedimientos para el dimensionamiento de sistemas de riego por goteo. Esto permite valorar distintas ventajas e inconvenientes entre ellos, enfocadas fundamentalmente en la utilización racional del agua y la energía de cara al Cambio Climático.

### Datos básicos utilizados para desarrollar los procedimientos

Se asumió una superficie bruta de 7,56 ha., conformada por cuatro parcelas de riego rectangulares de (80 m x 200 m), ubicadas en pareja a ambos lados de la estación de control, el estudio se desarrolló en la finca Los Milian, en la provincia Ciego de Ávila, entre las coordenadas 736039 Norte y 229762 Este. En la misma estará concentrada la instalación de bombeo junto con el sistema de filtrado para facilitar la automatización del riego. Las parcelas de riego estarán separadas a 10 m para facilitar la construcción del sistema de drenaje y las labores de cosecha. Se prevé un camino perimetral de 5 m.

La fuente de abasto es subterránea, con un caudal autorizado a extraer suficiente para el riego del cultivo propuesto. Se asumirá para el diseño CU = 90 %, el relieve llano y el terreno horizontal,

assumed as well, the water quality is considered suitable for crop irrigation, the salinity of the irrigation water is assumed  $EC_{IW} = 0.696$  dS/m. The texture is Clay – Loam and homogeneous. Soil depth ranges from 0.75 to 1.5 m; Field capacity = 43 %V; Soil porosity = 38 %; Volumetric moisture = 30 %, Matric potential of Soil = -0.33 Bar and Wilting point = 8.6 %V;  $EC_{SE} = 1.45$  dS/m, corresponding to a guarantee of 90 % production Pizarro Cabello, cited by Martínez (2001)

The irrigating crop is Valencia Orange, planted at 6 x 4, with an average height of 3 m diameter of the tree canopy = 4.6 m and root depth = 1.10 m a  $K_L = 0.7$  was obtained. The evapotranspiration of the reference crop = 6.5 mm/d,  $K_{VC} = 1.2$  is also assumed, and  $K_A = 0.9$  will be taken for the design. The type of emitter is auto-compensating, which discharge = 4 L/h with a compensation range between 49 kPa and 294 kPa. At least 33% of the vital area of the plant should be moistened.

### Evaluated procedures

#### PROCEDURE BASED ON FIELD TEST

#### Net water requirements [Nn (mm/d)]

$$Nn = ET_o \times Kc \times Kl \times Kvc \times Ka \quad (1)$$

The value of the evapotranspiration of the reference crop (ETo) must be affected by different coefficients that affect the consumption of the plant and therefore its growth and development. The estimation of crop coefficient (Kc) was obtained according to Richard Allen cited by Allen et al. (2006); Jensen & Allen (2016), after calculating the Kc values for the stages of the vegetative cycle, the highest value among them was chosen,  $Kc = 0.7$ , corresponding to the middle phase. Was followed the criterion of the fraction of the area shaded by the crop, to compute (KL), the value = 0.67 was obtained. The crop water requirements are considered due to the evapotranspiration ( $ETc = ET_o \times Kc$ ), according to (1), the peak net water requirements resulted:  $Nn = 3.29$  mm/d.

#### Total water requirements [N<sub>T</sub> (mm/d)]

They take into account the leaching requirements and the irrigation efficiency, the risk of salinity was assumed as more significant of these two parameters, the peak total water requirements were computed by:

$$Nt = \frac{Nn}{CU \times (1 - K)} \quad (2)$$

$$K = \frac{EC_{iw}}{2 \times EC_{se}} \quad (3)$$

Where:

CU.- Coefficient of uniformity of flow distribution (%).

K.- Should be consider, leaching needs or deep percolation losses.

$EC_{IW}$ - Electrical conductivity of irrigation water (dS/m)

la calidad del agua se considera apta para el riego del cultivo, la salinidad del agua de riego se asume  $CE_{AR} = 0,696$  dS/m. La textura es media – arcillosa y el grado de estratificación se considera homogéneo. La profundidad del suelo oscila entre 0,75 y 1,5 m, la capacidad de campo es de 43 %V, la porosidad del suelo = 38%, la humedad volumétrica = 30 %, el potencial mátrico del suelo = -0,33 Bar y el punto de marchitamiento = 8,6 %V;  $CE_{ES} = 1,45$  dS/m, correspondiente a una garantía de producción del 90% Pizarro Cabello, citado por Martínez (2001).

El cultivo a beneficiar es Naranja Valencia, sembrada a 6 x 4 con altura promedio = 3 m, diámetro de la copa = 4,6 m y profundidad radicular = 1,10 m, se obtuvo un coeficiente de localización = 0,7. La evapotranspiración del cultivo de referencia = 6,5 mm/d, se asume además como coeficiente de variabilidad climática = 1,2, se tomará para el diseño un coeficiente de advección = 0,9 El emisor será del tipo autocompensante, con descarga de 4 L/h en un rango de compensación entre 49 kPa y 294 kPa se deberá humedecer como mínimo el 33% del área vital de la planta.

### Procedimientos evaluados

#### PROCEDIMIENTO BASADO EN ENSAYOS DE CAMPO

#### Necesidades netas puntas [Nn (mm/d)]

$$Nn = ET_o \times Kc \times Kl \times Kvc \times Ka \quad (1)$$

El valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) se debe afectar por diferentes coeficientes que inciden en el consumo de la planta y por tanto en su crecimiento y desarrollo. La estimación del valor del coeficiente bioclimático del cultivo (Kc) se realizó de acuerdo con Richard Allen citados por Allen et al. (2006); Jensen & Allen (2016), luego de ser calculados los valores de los coeficientes para las etapas del ciclo vegetativo del cultivo, se escogió el mayor valor entre ellos,  $Kc = 0,7$ , correspondiente a la fase media. Para obtener (KL) se siguió el criterio de la fracción del área sombreada por el cultivo, de acuerdo con esto, se obtuvo un valor = 0,67. Las necesidades netas de agua se consideran las debidas a la evapotranspiración del cultivo ( $ETc = ET_o \times Kc$ ), de acuerdo con (1), las necesidades netas puntas. Resultaron:  $Nn = 3,29$  mm/d.

#### Necesidades totales [N<sub>T</sub> (mm/d)].

Tienen en cuenta las necesidades de lavado y la eficiencia de riego, de estos dos parámetros se asumió como el más exigente el riesgo de salinidad. Este parámetro se estima por:

$$Nt = \frac{Nn}{CU \times (1 - K)} \quad (2)$$

$$K = \frac{EC_{iw}}{2 \times EC_{se}} \quad (3)$$

donde:

CU. - Coeficiente de uniformidad de distribución de los caudales (%).

K.- Son para el ejemplo las necesidades de lavado.

$CE_{AR}$ . - Conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m)

EC<sub>ES</sub>- Electrical conductivity of the soil saturation extract (dS/m), this parameter is imposed as the objective to be achieved with leaching.

To anticipate the possible harmful effects of the increase in salinity, a maintenance wash should be programmed through the irrigation, this implies increasing the irrigation dose with a certain value known as the leaching dose, according to (2): N<sub>T</sub> = 4.81 mm/d equivalent to 115.44 L/p/d.

The following expression allows selecting the results of the field test, besides the water needs they constitute the starting point of the design.

$$0.9 \times pr < pb < 1.2 < pr \quad (4)$$

where:

pb.- Depth at which the wet bulb develops (m), or the continuous wetting band.

This formula establishes limits to the depth of the wet bulb, so that for certain values of (pb) there correspond a number of emitters per plant and an adequate percentage of wetted surface that guarantees that the wetted surface is greater than the minimum needs defined by (PH<sub>MÍN</sub>) in the example pr = 1.10 m. Once obtained (N<sub>T</sub>) the results of the field test are arranged in table 1, to find the most appropriate parameters. From (4) the range of (pb) is identified, and with this, the wet radius reached by the drip is assumed, and the volume delivered under those conditions. With (pb) the moistened area (Ae) and the minimum number of emitters (e) are estimated, which guarantees the soil volume to be moistened.

CE<sub>ES</sub>- Conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo (dS/m).

Para prever los posibles efectos perjudiciales del incremento de la salinidad se deberá programar un lavado de mantenimiento a través del riego, esto implica incrementar la dosis de riego con cierto valor que se conoce como dosis de lavado, de acuerdo con (2): N<sub>T</sub> = 4,81 mm/d equivalentes a 115,44 L/p/d.

La siguiente expresión permite seleccionar los resultados de la prueba de campo y de conjunto con las necesidades de agua constituyen el punto de partida del diseño.

$$0.9 \times pr < pb < 1.2 < pr \quad (4)$$

donde:

pb. - Profundidad a que se desarrolla el bulbo húmedo (m), o la franja de humedecimiento continuo según corresponda.

Esta fórmula establece unos límites a la profundidad del bulbo húmedo, de forma que para determinados valores de (pb) corresponden un número de emisores por planta y un porcentaje adecuado de superficie humedecida que garantiza que la superficie mojada sea mayor que las necesidades mínimas definidas por (PH<sub>MÍN</sub>), para el ejemplo pr = 1,10 m Obtenida (N<sub>T</sub>), los resultados de la prueba de campo se acomodan en la Tabla 1, para encontrar los parámetros más apropiados. A partir de (4) se identifica el rango de (pb), y con éste, se asume el radio húmedo que alcanza el gotero, y el volumen que entrega en esas condiciones. Con (pb) se estima el área humedecida (Ae) y la cantidad mínima de emisores (e), que garantiza el porcentaje a humedecer.

TABLE 1. - Results of the field test used in the analysis.(Pizarro Cabello cite by Universidad Santo Tomas (2003)

TABLA 1.- Resultados de la prueba de campo utilizado en el análisis (Pizarro Cabello citado por Universidad Santo Tomás (2003)

Ve (L)	Re (m)	pb (m)
20	0.76	0.69
24	0.80	0.90
<b>28</b>	<b>0.83</b>	<b>1.05</b>
<b>32</b>	<b>0.86</b>	<b>1.22</b>
36	0.90	1.40
40	0.91	1.60

**Wetted area by the emitter [Ae (m<sup>2</sup>)]**

Assuming a depth = 1.22 m, the radius that dampens the emitter = 0.86 m and the volume that it delivers = 32 L; the wetted surface per emitter is estimated by:

$$Ae = \pi Re^2 = 2.32 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Where:

Re.- The radius moistens the dropper (m) and is obtained directly from the field test for the assumed depth.

The separation between emitters on the side [Se (m)] can be obtained by means of:

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

Where:

a.- Percentage of overlap between the wet bulbs, its value can range between 10 and 30%, if the condition (Se < ϕ<sub>bulbo</sub>) that

**Área mojada por el emisor [Ae (m<sup>2</sup>)]**

Asumiendo una profundidad = 1,22 m, el radio que humedece el emisor = 0,86 m y el volumen que entrega = 32 L; la superficie humedecida por emisor se estima por:

$$Ae = \pi Re^2 = 2.32 \text{ m}^2 \quad (5)$$

donde:

Re.- Es el radio que humedece el gotero (m) y se obtiene directamente de la prueba de campo para la profundidad seleccionada.

La separación entre emisores en el lateral [Se (m)] se puede obtener por medio de:

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

Donde:

a.- Porcentaje de solapamiento entre los bulbos húmedos, su valor puede oscilar entre el 10 y el 30%, siempre que se cumpla la



has been set for physiological reasons of the plant. (Se) is generally assumed based on the separation between plants in the same row, if there is an integer number of emitters per plant. For the example (PH<sub>MÍN</sub> = 33 %).

condición (Se < φ<sub>bulbo</sub>) que ha sido fijada por razones fisiológicas de la planta. Cuando se trata de un número entero de emisores por planta, (Se) es generalmente asumido en función de la separación entre plantas de una misma hilera. Para el ejemplo (PH<sub>MÍN</sub> = 33 %).

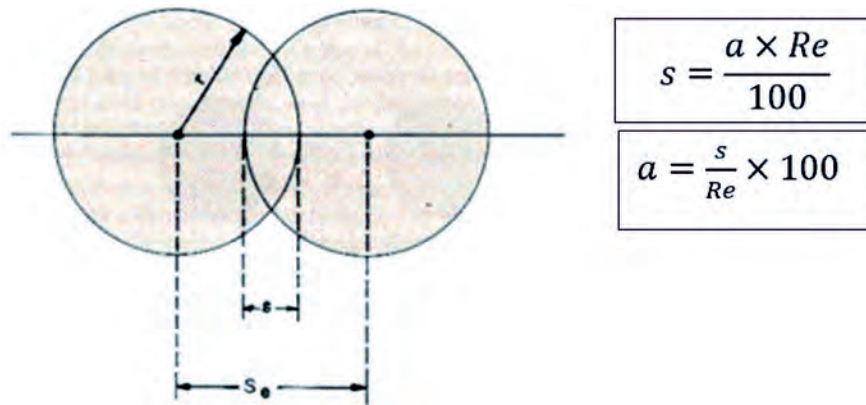


FIGURE1.- Overlap between wet bulbs (Arapa, 2002).  
 FIGURA 1.- Solape entre bulbos húmedos (Arapa, 2002).

TABLE 2.- Minimum wetting percentage, (Rodrigo López cited by Selléz & Ferreira (2002))  
 TABLA 2.- Porcentaje de humedecimiento mínimo, (Rodrigo López citado por Selléz & Ferreira (2002))

Author	Descripción	
Keller (1974), cited by Dorta & Vargas (2017)	Arid climate zones.	PH <sub>MÍN</sub> > 33 %
	Wide planting frame crops.	
Keller (1978), cited by Dorta & Vargas (2017)	High rainfall areas.	PH <sub>MÍN</sub> > 20 %
	Medium or clay texture.	
	Low rainfall areas.	33 % < PH <sub>MÍN</sub> < 50 %
Myers & Harrison (1973) Harrison & Myers (1974), cited by Dorta & Vargas (2017)	Humid areas.	25 % < PH <sub>MÍN</sub> < 50 %
	Low rainfall areas.	
	Citrus and Fruit trees (*).	25 % < PH <sub>MÍN</sub> < 35 %
Torralba (1990), cited by Dorta & Vargas (2017)	Banana (*).	40 % < PH <sub>MÍN</sub> < 60 %
	Coffee (*).	30 % < PH <sub>MÍN</sub> < 40 %
	Horticultural crops (*).	50 % < PH <sub>MÍN</sub> < 70 %
	Hydroponics and Pots	100 %

(\*) The percentages vary from the lower value to the higher value as the aridity of the climate increases, the lightness in texture and stony ground.

**Number of emitters that dampen the same plant [e (u)]**

$$e \geq \frac{A_{MP} \times PH_{min}}{100 \times Ae} \tag{7}$$

Where:

A<sub>MP</sub>- Planting frame area (m<sup>2</sup>), for the example = 24 m<sup>2</sup>  
 PH<sub>MÍN</sub>- Minimum wetting percentage. In Table 2, (Keller *et al.* cited by Dorta & Vargas (2017) recommend values for trees crops and suggests guide values for Cuba conditions e ≥ 3.41 ≈ 4 drippers/plant.

It is convenient to check that the volume delivered by the emitter satisfies the crop’s water needs and those for washing in the case of the presence of salts in the soil solution, for a given irrigation frequency. The following expression allows analytical verification of this situation. (I) was assumed daily for the two variants and (Ve) is verified by:

**Número de emisores que humedecen una misma planta [e (u)]**

$$e \geq \frac{A_{MP} \times PH_{min}}{100 \times Ae} \tag{7}$$

donde:

A<sub>MP</sub>- Área del marco de plantación (m<sup>2</sup>), para el ejemplo = 24 m<sup>2</sup>.  
 PH<sub>MÍN</sub>- Porcentaje de humedecimiento mínimo. En la Tabla 2, Keller y otros autores citados por Dorta & Vargas (2017), recomiendan valores para el caso de árboles y proponen valores orientativos para Cuba: e ≥ 3,41 ≈ 4 goteros/planta

Conviene comprobar que el volumen que entrega el emisor, satisface las necesidades de agua del cultivo y las de lavado en el caso de presencia de sales en la solución del suelo, para una frecuencia de riego determinada. La siguiente relación permite comprobar analíticamente este aspecto. (I) se asumió diaria para las dos variantes y (Ve) se comprueba por:

$$Ve = \frac{I \times Nt}{e} = 28.86 L. \tag{8}$$

In Table 1 there is a similar value  $Ve = 28 L$ , which corresponds to  $Re = 0.83 m$  y  $pb = 1.05 m$ , for these parameters the area that the emitter dampens (5) is  $2.16 m^2$ , the actual wetting percentage is checked by (7),  $P = 36 \%$ , which is greater than the 33% initially assumed. The higher percentage of damping is due to the approximate excess of the number of emitters, this situation is feasible to solve with the management of irrigation depending on its duration.

**Irrigation time [ $T_R$  (h)]**

As the volume applied by the dripper ( $Ve$ ) must be  $\geq (N_T)$ , the duration of irrigation is obtained by:

$$Tr = \frac{Nt}{e \times qa} \tag{9}$$

Where:

$q_a$  - Emitter discharge (4 L/h).

The duration of the irrigation would be:  $T_R = 7.22 h$ , and it is rounded up in a fraction of 0.25 hours, for this reason,  $T_R = 7$  hours y 15 minutes is taken. Thus, (10) let obtain final irrigation dose.

**Irrigation dose [ $D_R$  (L)]**

$$Dr = Tr \times e \times qa \tag{10}$$

where:

$D_R = 116 L/p$ , which is slightly higher than  $(N_T)$ .

**Verification of restriction for agronomic design**

$$D_R \geq N_T \text{ and } P \geq PH_{M\acute{I}N}$$

**PROCEDURE BASED ON THE CRITERION OF THE OPTIMUM IRRIGATION POINT**

The optimal point of irrigation was previously defined as that in which soil moisture represents a certain fraction of the useful water of the root zone, but practice has shown that it must be defined in terms of water potential and not moisture content, even if this relationship is necessary to determine the frequency and dose of irrigation. The procedure starts from knowing the optimal potential of the crop; for the comparison,  $\Psi_{\acute{O}PTIMO} = -1$  Bar is assumed from table 3.

**TABLE 3.- Optimal water potential for irrigation (negative values in Bar) Pizarro Cabello cited by Universidad Santo Tomas (2003)**  
**TABLA 3.- Potencial hídrico óptimo de riego (valores negativos en Bar) (Pizarro Cabello citado por Universidad Santo Tomás (2003)**

<b>Dried Onion</b>	0.55 – 0.65	<b>Melon fruit</b>	0.35 – 0.4	<b>Vine</b>	0.4 – 1
<b>Secondary Cereals</b>	0.4 – 1*	<b>Orange trees</b>	0.2 – 1	<b>Carrot</b>	0.55 – 0.65
<b>Cabbage</b>	0.6 – 0.7	<b>Potatoes</b>	0.3 – 0.5		

$$Ve = \frac{I \times Nt}{e} = 28.86 L. \tag{8}$$

En la Tabla 1, hay un valor similar  $Ve = 28 L$  que se corresponde con  $Re = 0,83 m$  y  $pb = 1,05 m$ , para estos parámetros el área que humedece el emisor (5) es  $2,16 m^2$ . El porcentaje real de humedecimiento se comprueba con (7),  $P = 36 \%$ , que es mayor que el 33 % asumido inicialmente, el mayor porcentaje de humedecimiento se debe al aproximar por exceso el número de emisores, esta situación es viable de solucionar con el manejo del riego en función de su duración.

**Tiempo de riego [ $T_R$  (h)]**

Como el volumen aplicado por el gotero ( $Ve$ ) debe ser  $\geq (N_T)$ , la duración del riego se obtiene por:

$$Tr = \frac{Nt}{e \times qa} \tag{9}$$

donde:

$q_a$  - Caudal que emite un emisor (4 L/h).

La duración del riego sería:  $T_R = 7,22 h$ , y se redondea por exceso en fracción de 0,25 horas, por ello se toma  $T_R = 7$  horas y 15 minutos. Así la dosis de riego definitiva se obtiene por (10).

**Dosis de riego [ $D_R$  (L)]**

$$Dr = Tr \times e \times qa \tag{10}$$

donde:

$D_R = 116 L/p$ , que es ligeramente superior que  $(N_T)$ .

**Verificación de la restricción para el diseño agronómico**

$$D_R \geq N_T \text{ y } P \geq PH_{M\acute{I}N}$$

**PROCEDIMIENTO BASADO EN EL CRITERIO DEL PUNTO ÓPTIMO DE RIEGO**

El punto óptimo de riego se definía anteriormente como aquel en que la humedad del suelo representa una determinada fracción del agua útil de la zona radicular, pero la práctica ha demostrado que debe definirse en términos de potencial hídrico y no de contenido de humedad, aunque esta relación sea necesaria para determinar la frecuencia y la dosis de riego. El procedimiento parte de conocer el potencial óptimo del cultivo; para la comparación se asume  $\Psi_{\acute{O}PTIMO} = -1$  Bar, tomado de la Tabla 3.

For the design, it is necessary to calculate the dose and the irrigations interval, for which it is necessary to know the relationship osmotic potential and matric potential – humidity ( $\Psi_o$  vs.  $\theta$ ;  $\Psi_M$  vs.  $\theta$ ), the latter constitutes data to be provided by the previous Technique Task to design. The osmotic potential can be estimated by means of:

$$\Psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEse \tag{11}$$

Where:

$\varepsilon$ .- Soil porosity (%).

$\theta_v$ .- Volumetric humidity (%).

Table 4 can estimate optimal water potential and moisture content relationship.

La relación potencial osmótico y potencial mátrico – humedad ( $\Psi_o$  vs.  $\theta$ ;  $\Psi_M$  vs.  $\theta$ ), permite calcular la dosis y el intervalo entre riegos, esta última constituye un dato a aportar por la Tarea de Técnica y el potencial osmótico se puede estimar por medio de:

$$\Psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEse \tag{11}$$

donde:

$\varepsilon$ .- Porosidad del suelo (%).

$\theta_v$ .- Humedad volumétrica (%).

La relación potencial hídrico óptimo VS contenido de humedad, se estima por la Tabla 4.

**TABLE 4.-  $\Psi_o$  vs.  $\theta$  relationship, according to Taylor *et al.*, 1972, cited by Pizarro Cabello cited by Universidad Santo Tomas (2003)**  
**TABLA 4.- Relación  $\Psi_o$  vs.  $\theta$  según Taylor *et al.*, 1972, citado por (Pizarro Cabello citado por Universidad Santo Tomás (2003)**

$\theta_v$ (%V)	$\Psi_M$ (bar)	$\Psi_o$ (bar)	$\Psi_{\text{ÓPTIMO}}$ (bar)
23	-0.58	-0.86	-1.44
24	-0.53	-0.83	-1.33
25	-0.48	-0.79	-1.27
26	-0.44	-0.76	-1.20
27	-0.40	-0.74	-1.14
28	-0.37	-0.71	-1.08
29	-0.35	-0.68	-1.03
30	-0.33	-0.66	-0.99

In which ( $\Psi_{\text{ÓPTIMO}} = \Psi_M + \Psi_o$ ), this value corresponds to the moisture content in the soil ( $\theta_v$ ), which is the parameter that allows estimating the irrigation dose by means of:

$$Dr = Prad \times \frac{CC - \theta_v}{100} \tag{12}$$

Also the frequency of irrigation by means of:

$$IR = \frac{Dr}{Eto} \tag{13}$$

The osmotic potential was determined by means of:

$$\Psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEes \tag{14}$$

When adding this value to the matric potential of the soil ( $\Psi_M$ ), the optimal potential of the Orange resulted  $\Psi_{\text{ÓPTIMO}} = -0.99$  Bar.

When comparing this value with the minimum allowable established by the authors, and above which, decrease crop production (table 4); It is checked that it is within the permissible limits. If it is less, an extra irrigation dose should be applied, such that it significantly increases the humidity or reduces the salinity in the soil solution to acceptable values. For moisture content in the soil ( $\theta_v = 30\%$ ), the irrigation dose can be estimated by means of (12):

$$D_R = 14.3 \text{ mm}$$

En la cual ( $\Psi_{\text{ÓPTIMO}} = \Psi_M + \Psi_o$ ), valor que se corresponde con el contenido de humedad en el suelo ( $\theta_v$ ), y que permite estimar la dosis de riego por medio de:

$$Dr = Prad \times \frac{CC - \theta_v}{100} \tag{12}$$

Y la frecuencia de riego por medio de:

$$IR = \frac{Dr}{Eto} \tag{13}$$

El potencial osmótico se determinó por medio de:

$$\Psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEes \tag{14}$$

Al añadir este valor al potencial mátrico del suelo ( $\Psi_M$ ), el potencial óptimo de la Naranja resultó  $\Psi_{\text{ÓPTIMO}} = -0.99$  Bar.

Cuando se compara este resultado con el mínimo permisible establecido por otros autores (y por encima del cual la respuesta productiva del cultivo se resiente, Tabla 4), se comprueba que el valor obtenido está dentro de los límites permisibles. Si este valor resultara menor habría que añadir una dosis de riego extra para incrementar la humedad o disminuir la salinidad en la solución del suelo hasta valores aceptables. Para el contenido de humedad en el suelo ( $\theta_v = 30\%$ ), la dosis de Riego se puede estimar por medio de (12):

$$D_R = 14,3 \text{ mm}$$

And the irrigation frequency by means of (13):

$$I = 2,2 \approx 2 \text{ d}$$

## RESULTS AND DISCUSSION

### Results of the procedures described

Crop water needs are the same for the two variants, because the reference evapotranspiration remained constant for the purposes of comparison, however (ETc) is not taken into account in the design of the 2<sup>nd</sup> variant. Variant 1 considers the most agronomic aspects regarding to the number of emitters per plant (e), this parameter is very important because it significantly affects the response of crop production and the initial investment cost of the system and is not taken into account in the 2<sup>nd</sup> variant.

Regarding the volume delivered by the emitter (Ve/P), this parameter is taken into account in the 1st variant and influences the number of emitters per plant and the duration of irrigation. However, it does not intervene in variant 2, despite its influence on the increase and uniformity of yields, and it also allows estimating the real percentage of wetted surface per plant (P).

In the case of the irrigation timing (T<sub>R</sub>) and the irrigation dose (D<sub>R</sub>), these parameters are highly related to the emitter discharge (q<sub>a</sub>) and the number of emitters per plant (e). The greater the number of these, the smaller (T<sub>R</sub>) and as a consequence (D<sub>R</sub>), would be slightly higher than the total water needs of the plant. However in the 2<sup>nd</sup> variant (D<sub>R</sub>), despite being higher, does not take into account possible deep percolation losses or leaching needs, instead consider replenishing moisture to a content equivalent to field capacity or optimal irrigation point.

### Analysis of the results

The dimensions and the depth of the wet bulb (pb) are parameters distinguishing variant 1, they constitute the possibility that the wetting bulbs are located in an appropriate way, according to the crop root zone. This is not only important for the assimilation of nutrients by the plant and the effectiveness of fertigation, but also because it favours a better anchorage of the plants. There are an important characteristic of the first variant, though, it's not consider, the pressure at which moisture is retained in the soil solution, then, rational and efficient design of the drip irrigation system is not fully resolved using only this procedure.

Dorta & Vargas (2017), have developed investigations to improve the field test procedure and suggest estimating the effective diameter of the wet bulb to guarantee the appropriate humidity content in the wet bulb, because it's decrease towards the periphery and must be the equivalent to the field capacity. In this way, greater rigor is achieved in the design and a more rational use of irrigation water. These authors conclude that the combination of the procedures shown coupled to a model that simulates the behaviour of humidity in the wet bulb, leads to a more appropriate design procedure for Cuba conditions.

Y la frecuencia de riego por medio de (13):

$$I = 2,2 \approx 2 \text{ d}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de los procedimientos descritos

Las necesidades de agua del cultivo son las mismas para los dos variantes, debido a que la evapotranspiración de referencia se mantuvo constante a los efectos de la comparación, sin embargo (ETc) no es tenida en cuenta en el diseño de la variante 2. Con relación al número de emisores por planta (e), la variante 1 es la que más aspectos agronómicos considera, este parámetro es muy importante porque incide significativamente en la respuesta productiva del cultivo y en el costo de inversión inicial del sistema y tampoco es tenido en cuenta en la 2da variante.

Referente al volumen entregado por el emisor (Ve/P), este parámetro es tenido en cuenta en la 1ra variante e influye en el número de emisores por planta y la duración del riego. Sin embargo, no interviene en la 2da variante, a pesar de su influencia en el incremento y la uniformidad de los rendimientos, y además permite estimar el porcentaje real de superficie humedecida por planta (P).

En el caso de la duración del riego (T<sub>R</sub>) y la dosis (D<sub>R</sub>), son parámetros que están sumamente relacionados con el caudal del emisor (q<sub>a</sub>) y número de emisores (e) ya que a mayor número de estos, menor será (T<sub>R</sub>) y como consecuencia (D<sub>R</sub>), sería ligeramente mayor que las necesidades totales de agua de la planta, sin embargo en la variante 2 la dosis de riego, a pesar de ser mayor no tiene en cuenta las posibles pérdidas por percolación o las necesidades de lavado, en su lugar considera reponer la humedad hasta alcanzar un contenido equivalente a la capacidad de campo o al punto óptimo de riego.

### Análisis de los resultados

Los parámetros que distinguen la variante 1, son la profundidad a que se desarrolla el bulbo húmedo (pb) y sus dimensiones, ya que constituyen la posibilidad de que los bulbos de humedecimiento queden ubicados de manera apropiada, con relación a la zona de ramificación densa del cultivo, esto no solo es importante para la asimilación de nutrientes por parte de la planta y la eficacia del fertirriego, sino también porque propicia un mejor anclaje de las plantas. Este aspecto constituye un detalle a favor de la primera variante, sin embargo, al no considerar ésta, la tensión a la cuál es retenida la humedad en la solución del suelo, el diseño racional y eficiente del sistema de riego por goteo no queda totalmente resuelto utilizando únicamente este procedimiento.

Dorta & Vargas (2017), han desarrollado investigaciones que apuntan a mejorar el procedimiento establecido para realizar las pruebas de campo y plantean que dado que la humedad dentro del bulbo disminuye hacia la periferia es necesario estimar el diámetro efectivo del bulbo húmedo para garantizar que el contenido de humedad que tiene lugar en la zona húmeda y donde se desarrollan las raíces activas de la planta, sea el equivalente a la capacidad de campo, de esta forma se alcanza mayor rigor en el diseño y una utilización más racional del agua de riego. Estos autores concluyen, que la combinación de los procedimientos mostrados, acoplados a un modelo que simule el comportamiento de la humedad dentro del



Besides, they propose to obtain during the field test, two other parameters necessary to increase the rigor of the irrigation system design. The water retention curve and humidity content at the periphery of the bulb in both, horizontal and vertical directions, which provides valid criteria to estimate the appropriate (Se).

The theoretical foundation of 2<sup>nd</sup> variant, starts from accepting the theory of water potential of the soil, as valid for plants. Despite considering the relationship between moisture content, optimal crop potential, and hydrophysical properties of the soil, its use implies the need of tensiometers or other measuring instruments that indicate the tension at which moisture is retained in the soil, besides, the appropriate volume of moistened soil depends on the location of these instruments in relation to the plant.

Total water needs ( $N_T$ ) are not taken into account during the design procedure of 2<sup>nd</sup> variant, only [ETo (mm/d)] intervenes to estimate the irrigation frequency. Despite not being able to increase from the design procedure, the irrigation dose to be applied, it can be affirmed that considering the osmotic potential in the soil solution, the negative effect of soil salinity is also taken into account, the same as in the 1st. variant. The anticipating possible leaching needs or deep percolation losses are feasible this difficulty is resolved with the automation of the installation through which the stage and duration of irrigation are defined.

This increases the cost of the initial investment and the management of irrigation is dependent on the degree of automation of the installation, due to this, its application becomes more viable on a small scale, as can be the Green houses. Moreover, the irrigation interval was assumed two days for the 2<sup>nd</sup> variant, because the irrigation dose obtained, this result is valid for the drip irrigation technique as well and is justified by the fact that the irrigation dose being applied is much higher than in the 1st variant.

### Prospects for the use of Simulation Software

One of the most important elements in the design of drip irrigation systems is the shape and dimensions of the water distribution below the emitters. According to Kandelous *et al.* (2008); Kandelous & Šimůnek (2010), the volume of wet soil and its extension is a function of the texture and structure of the soil, the saturated hydraulic conductivity and the initial and residual moisture content, as well as ( $q_a$ ) and (Ve). The relative position of the emitter, the frequency and duration of irrigation, temporal and spatial changes in moisture content, also affect the movement of water in the wet zone.

If the distribution of water in the wet soil volume is known, the emitters can be located in the adequate placement for water and nutrients in the root zone of the plants is guaranteed. However, few studies show the dynamics of water distribution in the soil with drip irrigation, there were developed under field conditions to determine the distribution and the wetting pattern, using analytical and numerical models, to predict the wetting patterns, derived

bulbo de humedecimiento, conlleva a un procedimiento de diseño más apropiado para las condiciones de Cuba.

En este sentido proponen obtener durante la prueba de campo, otros dos parámetros necesarios para incrementar el rigor de la prueba y su efecto positivo para el diseño de la instalación: la tensión de humedad en la periferia del bulbo en ambos sentidos, horizontal y vertical, el cual aporta criterios válidos para estimar la separación entre emisores a lo largo del lateral de riego, así como el contenido de humedad, cuyo valor es de gran utilidad en las cuestiones de manejo del agua de riego.

Con relación a la variante 2, su fundamento teórico parte de aceptar la teoría del potencial hídrico del suelo como válida para las plantas; y a pesar de considerar la relación entre el contenido de humedad y potencial óptimo de cultivo, así como algunas características y propiedades hidrofísicas del suelo, su utilización implica la necesidad de utilizar tensiómetros u otros instrumentos de medición que indiquen la tensión a que es retenida la humedad en el suelo, siendo así, el volumen de suelo humedecido apropiado depende de la ubicación de estos instrumentos con relación a la planta.

En esta variante no son tenidas en cuenta las necesidades totales ( $N_T$ ) durante el procedimiento de diseño solamente interviene [ETo (mm/d)] para estimar la frecuencia de riego, sin embargo, a pesar de no poder mayorear desde el diseño la dosis de riego a aplicar, para prever posibles necesidades de lavado o pérdidas por percolación, se puede afirmar que al considerar el potencial osmótico en la solución del suelo, el efecto negativo de la salinidad también es tenido en cuenta al igual que en la 1ra variante, esta dificultad queda resuelta con los automatismos de la instalación a través de los cuales se define el momento y la duración del riego.

Esto que en principio es más riguroso, presenta el inconveniente de que incrementa el costo de la inversión inicial y el manejo del riego es dependiente del grado de automatización de la instalación, debido a ello su aplicación se hace más viable a pequeña escala, como pueden ser las casas de cultivo. Por otro lado, está la cuestión de la frecuencia de riego, la misma se asumió diaria para la 1ra variante, pero resultó ser dos días en correspondencia con la dosis de riego obtenida, este resultado es válido para la técnica de riego por goteo y su valor se justifica en el hecho de que la dosis de riego que se está aplicando es mucho más alta que en la 1ra variante.

### Perspectivas de utilización de Software de Simulación

Uno de los elementos más importantes del diseño de los sistemas de riego por goteo es la forma y dimensiones de la distribución del agua debajo de los emisores. De acuerdo con Kandelous *et al.* (2008); Kandelous & Šimůnek (2010), el volumen de suelo mojado y su extensión, es función de la textura y la estructura del suelo, de la conductividad hidráulica saturada y el contenido de humedad inicial y residual, así como de ( $q_a$ ) y (Ve). La posición relativa del emisor, la frecuencia y duración del riego, cambios temporales y espaciales del contenido de humedad, también afectan el movimiento del agua en la zona húmeda.

Si se conoce la distribución del agua dentro del volumen de suelo mojado, los emisores se pueden ubicar de tal forma, que se garantice la colocación precisa del agua y los nutrientes en la zona radicular de las plantas. No obstante, existen pocos estudios que muestran la dinámica de la distribución del agua en el suelo

from experimental observations and from the solution of the Richards equation (Kandelous *et al.*, 2008; Kandelous & Šimůnek, 2010).

Kandelous & Šimůnek (2010) and Nafchi *et al.* (2011), ensure that, even though most of these models incorporate variables such as ( $q_a$ ), ( $V_e$ ) and hydraulic properties of soil for their predictions, many of them could not use for the design and management of drip irrigation systems, because they are based on solutions for which there are strong restrictions. Amin & Ekhmaj (2006); Kandelous & Šimůnek (2010) and Nafchi *et al.* (2011), argue for their part, that empirical and semi-empirical models typically developed through regression analysis or field observations are more convenient to use for the design and management of these irrigation systems.

**Among the simulation models developed there are:**

1. Schwartzman & Zur (1986) model:

They developed an empirical model derived from experimental observations and dimensional analysis to estimate the soil-wetting pattern from a surface emitter. They assumed that the geometry of the wetted area, its width and depth at the end of irrigation depend on the type of soil, represented by the hydraulic conductivity at saturation, discharge from the emitter and the total volume of applied water. The model was obtained in a silty soil and a sandy loam, with values of  $K_s = 2.49 \times 10^{-6}$  y  $2.49 \times 10^{-5}$  m/s y  $Q_e = 4.3$  y  $20$  L/h respectively:

$$\psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEes \tag{14}$$

$$w = 1.82 \times (V)^{0.22} \times \left(\frac{Ks}{Qe}\right)^{-0.17} \tag{15}$$

Where:

w y z.- They are the horizontal and vertical dimensions of the wetting bulb (m).

V.- It is the total volume of applied water (m<sup>3</sup>).

Ks.- It is the hydraulic conductivity at saturation (m<sup>3</sup>/s).

Qe.- It is the discharge cost of the emitter (m<sup>3</sup>/s).

2. Amin & Ekhmaj (2006) model:

They developed equations to estimate the horizontal and vertical advance of the wetting front in the soil through non-linear regression analysis. The experimental data come from four types of soil and  $Q_e = 2$  a  $8$  L/h.

$$R=0.2476 \times \Delta\theta^{-0.562} \times V^{0.268} \times Qe^{-0.0028} \times Ks^{-0.034} \tag{16}$$

$$Z=0.0336 \times \Delta\theta^{-0.383} \times V^{0.365} \times Qe^{-0.101} \times Ks^{-0.295} \tag{17}$$

Where:

R and Z.- They are the horizontal and vertical dimensions of the wetting pattern (m).

$\Delta\theta$ .- It is the average volumetric content of water behind the wetting front

( $\Delta\theta = \theta_s/2$ ), where  $\theta_s$  is the moisture content at saturation).

con riego por goteo en condiciones de campo, en este sentido, se han realizado estudios para determinar la distribución y el patrón de humedecimiento, usando modelos analíticos y numéricos, para predecir los patrones de humedecimiento, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards, (Kandelous *et al.*, 2008; Kandelous y Šimůnek, 2010).

Kandelous & Šimůnek (2010) y Nafchi *et al.* (2011), aseguran que, no obstante que la mayoría de estos modelos incorporan variables como ( $q_a$ ), ( $V_e$ ) y propiedades hidráulicas del suelo para sus predicciones, muchos de ellos no se presentan en forma directamente aplicable al diseño y manejo de sistemas de riego por goteo, además de basarse en soluciones para las cuales existen fuertes restricciones. Amin & Ekhmaj (2006); Kandelous & Šimůnek (2010) y Nafchi *et al.* (2011), plantean por su parte, que los modelos empíricos y semiempíricos desarrollados de forma típica a través de análisis de regresión o de las observaciones de campo, son más convenientes de utilizar para el diseño y manejo de estos sistemas de riego.

**Entre los modelos de simulación desarrollados se tienen:**

1. Modelo de Schwartzman & Zur (1986):

Desarrollaron un modelo empírico derivado de observaciones experimentales y análisis dimensional, para estimar el patrón de humedecimiento del suelo a partir de un emisor superficial. Asumieron que la geometría de la zona humedecida, la anchura y profundidad de la misma al final del riego dependen del tipo de suelo, representado por la conductividad hidráulica a saturación, descarga del emisor y volumen total de agua aplicada. El modelo fue obtenido en suelos limoso y franco arenoso, con valores de  $K_s = 2,49 \times 10^{-6}$  y  $2,49 \times 10^{-5}$  m/s y  $Q_e = 4,3$  y  $20$  L/h respectivamente:

$$\psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEes \tag{14}$$

$$w = 1.82 \times (V)^{0.22} \times \left(\frac{Ks}{Qe}\right)^{-0.17} \tag{15}$$

donde:

w y z.- Son las dimensiones horizontal y vertical del bulbo de humedecimiento (m).

V.- Es el volumen total de agua aplicada (m<sup>3</sup>).

Ks.- Es la conductividad hidráulica a saturación (m<sup>3</sup>/s).

Qe. - Es el gasto de descarga del emisor (m<sup>3</sup>/s).

2. Modelo de Amin & Ekhmaj (2006):

Desarrollaron ecuaciones para estimar el avance horizontal y vertical del frente de humedecimiento en el suelo a través de un análisis de regresión no lineal. Los datos experimentales provienen de cuatro tipos de suelo y  $Q_e = 2$  a  $8$  L/h.

$$R=0.2476 \times \Delta\theta^{-0.562} \times V^{0.268} \times Qe^{-0.0028} \times Ks^{-0.034} \tag{16}$$

$$Z=0.0336 \times \Delta\theta^{-0.383} \times V^{0.365} \times Qe^{-0.101} \times Ks^{-0.295} \tag{17}$$

donde:

R y Z.- Son las dimensiones horizontal y vertical del patrón de humedecimiento (m).

$\Delta\theta$ .- Es el contenido volumétrico promedio de agua detrás del frente de humedecimiento

V.- It is the total volume of applied water (m<sup>3</sup>).  
 Qe.- It is the discharge cost of the emitter (m<sup>3</sup>/s).  
 Ks.- It is the saturated hydraulic conductivity of the soil (m/s).  
 3. Kandelous *et al.* (2008) model:

These authors, using the method of dimensional analysis, developed equations to estimate the horizontal and vertical advances of the wetting front in the soil with a subsurface emitter. These equations were derived from experimental data obtained in a clay soil, with subsurface drip irrigation and Qe = 1 L/h.

$$w = 4.244 \times (V)^{0.526} \times \left( \frac{Ks}{Qe \times Z} \right)^{0.026} \quad (18)$$

$$z = 0.66 \times (V)^{0.333} \times \left( \frac{K}{Qe \times Z} \right)^{-1.67} \quad (19)$$

Where:

W y Z.- Horizontal and vertical dimensions of the wetting pattern (m).

V.- It is the volume of applied water that infiltrates the soil (m<sup>3</sup>).

Ks.- It is the saturated hydraulic conductivity (m/s).

Qe.- It is the discharge cost of the issuer (m<sup>3</sup>/s).

Z.- It is the installation depth of the emitter (m).

Cruz & Domínguez (2014); Cruz *et al.* (2015); Cruz *et al.* (2016) establishing a model to estimate the extension of the wetting bulb, taking into account the physical and hydraulic characteristics of three types of soil (sandy-loam, clay-loam and silt-loam). They exposed that the extension of the bulb is a function of the applied water volume (Ve), the emitter flow rate (Qe), as well as (Ks) the silt content and the initial and residual moisture content of the soil. In the experiment, the moisture content was measured at different depths, the saturated hydraulic conductivity of the different types of soil was determined and the parameters of the water retention curve and the saturated hydraulic conductivity of the soils were modelled by means of the ROSETTA 1.2 program (Schaap *et al.*, 2001). Two equations were obtained that predict the distribution of water within the bulb, with a reliability of 90 and 94 %, for emitter discharges of 0.002; 0.004 y 0.008 m<sup>3</sup>/h respectively.

$$r = 0.14 \times V^{0.353} \times Ks^{-0.110} \times \theta v^{-0.387} \quad (20)$$

$$Z = 7.906 \times \theta v^{0.386} \times \theta r^{0.349} \times V^{0.458} \times Qe^{-0.152} \times Li^{-0.421} \quad (21)$$

Where:

r.- It is the lateral advance (m).

Z.- It is the vertical advance (m).

V.- It is the volume of applied water (m<sup>3</sup>).

Ks.- It is the saturated hydraulic conductivity (m/s).

Qe.- It is the flow of the emitter (m<sup>3</sup>/s).

θv.- It is the initial moisture content of the soil (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

θr.- It is the residual moisture content of the soil (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

Li.- It is the silt content (%).

Through (20) it is shown that the lateral advance (r) is a function of the (Ve), (Ks) and of the initial moisture content of the soil. The vertical advance (Z) is explained according

(Δθ = θs/2), donde θs es el contenido de humedad a saturación).

V.- Es el volumen total de agua aplicada (m<sup>3</sup>).

Qe.- Es el gasto de descarga del emisor (m<sup>3</sup>/s).

Ks.- Es la conductividad hidráulica saturada del suelo (m/s).

3. Modelo de Kandelous *et al.* (2008):

Estos autores mediante el método de análisis dimensional, desarrollaron ecuaciones para estimar los avances horizontal y vertical del frente de humedecimiento en el suelo con un emisor subsuperficial. Estas ecuaciones se derivaron de datos experimentales obtenidos en un suelo arcilloso, con riego por goteo subsuperficial y Qe = 1 L/h.

$$w = 4.244 \times (V)^{0.526} \times \left( \frac{Ks}{Qe \times Z} \right)^{0.026} \quad (18)$$

$$z = 0.66 \times (V)^{0.333} \times \left( \frac{K}{Qe \times Z} \right)^{-1.67} \quad (19)$$

donde:

W y Z.- Dimensiones horizontales y verticales del patrón de humedecimiento (m).

V.- Es el volumen de agua aplicado que se infiltra en el suelo (m<sup>3</sup>).

Ks.- Es la conductividad hidráulica saturada (m/s).

Qe.- Es el gasto descarga del emisor (m<sup>3</sup>/s).

Z.- Es la profundidad de instalación del emisor (m).

Congruente con estos autores Cruz & Domínguez (2014); Cruz *et al.* (2015); Cruz *et al.* (2016), establecieron un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento, teniendo en cuenta las características físicas e hidráulicas de tres tipos de suelo (franco-arenoso, franco-arcilloso y franco-limoso) y demostraron que la extensión del bulbo es función del volumen de agua aplicada (Ve), del caudal del emisor (Qe), así como de (Ks) el contenido de limo y el contenido de humedad inicial y residual del suelo. En el experimento se midió el contenido de humedad a diferentes profundidades, se determinó la conductividad hidráulica saturada de los distintos tipos de suelo y se modelaron los parámetros de la curva de retención de agua y la conductividad hidráulica saturada de los suelos por medio del programa ROSETTA 1.2 (Schaap *et al.*, 2001). Se obtuvieron dos ecuaciones que predicen la distribución del agua dentro del bulbo, con una confiabilidad de 90 y 94%, para descargas de emisor de 0,002; 0,004 y 0,008 m<sup>3</sup>/h respectivamente.

$$r = 0.14 \times V^{0.353} \times Ks^{-0.110} \times \theta v^{-0.387} \quad (20)$$

$$Z = 7.906 \times \theta v^{0.386} \times \theta r^{0.349} \times V^{0.458} \times Qe^{-0.152} \times Li^{-0.421} \quad (21)$$

donde:

r.- Es el avance lateral (m).

Z.- Es el avance vertical (m).

V.- Es el volumen de agua aplicada (m<sup>3</sup>).

Ks.- Es la conductividad hidráulica saturada (m/s).

Qe.- Es el caudal del emisor (m<sup>3</sup>/s).

θv.- Es el contenido de humedad inicial del suelo (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

θr.- Es el contenido de humedad residual del suelo (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

Li.- Es el contenido de limo (%).

A través de (20) se muestra que el avance lateral (r) es función del volumen de agua aplicada (Ve), de (Ks) y del contenido

to equation (21) by  $(V_e)$ ,  $(Q_e)$ , the initial and residual moisture content of the soil, and the silt content, the variable that contributed the most to this movement was  $(V_e)$ , which is a consequence of  $(T_R)$  the results coincide with those reported by other researchers.

The water applied by the emitters is distributed forming humid bulbs of truncated ellipsoidal shape. These increase in extension until the capacity of the soil to absorb water is equal to the speed of water supply by the emitter. Initially, when the soil is dry, the penetration rate is faster, but if water continues to be added and as the pore spaces fill and the clays expand, the rate of penetration stabilizes. If the speed of water supply exceeds the infiltrability of the soil, the lateral or radial advance of the water in the bulb increases. When small volumes are applied, damping bulbs are obtained with elliptical shapes of horizontal elongation; but if it increases  $(T_R)$  or  $(Q_e)$ , the ellipse is elongated vertically.

Figure 2 shows the horizontal (x) and vertical (z) movement of the humidity, for the different textures studied  $(T_R)$  and  $(Q_e = 2 \text{ L/h})$ .

de humedad inicial del suelo. El avance vertical (Z) se explica de acuerdo con la ecuación (21) por  $(V_e)$ , el caudal del emisor  $(Q_e)$ , el contenido de humedad inicial y residual del suelo, y el contenido de limo. La variable que más contribuyó a este movimiento fue  $(V_e)$ , que es consecuencia de  $(T_R)$ , los resultados coinciden con los reportados por otros investigadores.

El agua que aplican los emisores se distribuye formando bulbos húmedos de forma elipsoidal truncada, estos aumentan su extensión hasta que la capacidad del suelo de absorber agua se iguala con la velocidad de aporte de agua por el emisor. Al inicio, cuando el suelo está seco, la velocidad de penetración es más rápida, pero si se sigue aportando agua y a medida que los espacios porosos se llenan y las arcillas se expanden, la velocidad de penetración se estabiliza. Si la velocidad de aporte de agua excede a la infiltrabilidad del suelo, el avance lateral o radial del agua en el bulbo aumenta. Cuando se aplican volúmenes pequeños, se obtienen bulbos de humedecimiento con formas elípticas de elongación horizontal; pero si se incrementa  $(T_R)$  o  $(Q_e)$ , la elipse se elonga de manera vertical.

La Figura 2, muestra el movimiento horizontal (x) y vertical (z) de la humedad, para diferentes texturas,  $(T_R)$  y  $(Q_e = 2 \text{ L/h})$ .

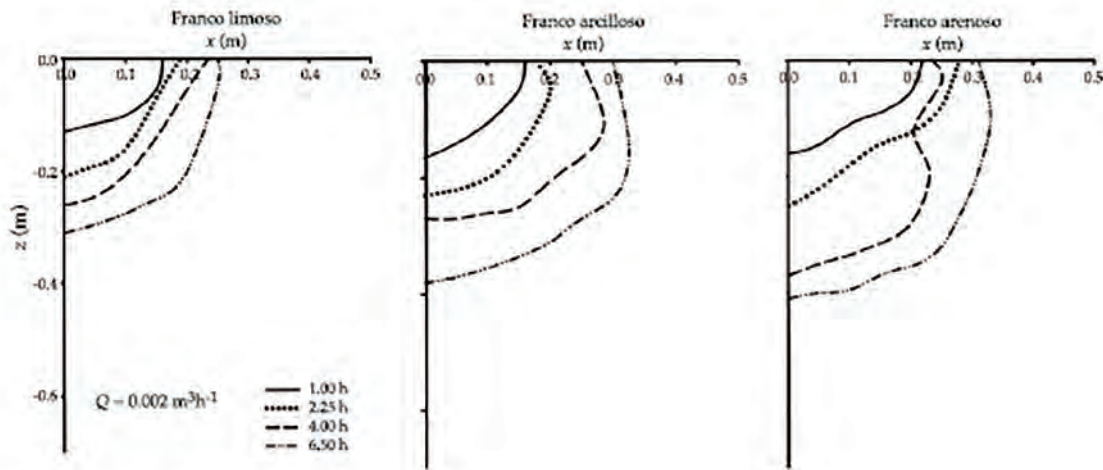


FIGURE 2.-Wet bulb advancement in drip irrigation Cruz *et al.* (2015).  
 FIGURA 2.- Avance del frente húmedo en riego por goteo Cruz *et al.* (2015).

These experiences confirm that the shape and extension of the moistening bulbs that are obtained under a drip emitter allow estimating with adequate rigor the number of emitters necessary to wet a certain volume of soil. However, the humidity inside the wetting bulb decreases towards the periphery, which constitutes the border where the accumulation of salts in the soil solution begins to occur. Therefore, the field test must also take into account: the moisture content and tension within the wet bulb, so that these values can be calculate in the horizontal and vertical direction of the wet bulb.

This would make it possible to know the effective diameter of the moistening bulb, within which, the humidity state will be that corresponding to the field capacity, and therefore the retention of soil moisture, will be favourable for the crop to show its best performance. It will also allow to assume an adequate overlap percentage (a) and estimate by means of (5), the area moistened by the emitter, which

Estas experiencias confirman que la forma y extensión de los bulbos de humedecimiento que se obtienen bajo un emisor de goteo permiten estimar con el rigor adecuado el número de emisores necesarios para mojar un determinado volumen de suelo, sin embargo, la humedad en el interior del bulbo de humedecimiento disminuye hacia la periferia, la cual constituye la frontera donde comienza a ocurrir la acumulación de sales en la solución del suelo. Por ello, la realización de la prueba de campo debe tener en cuenta, además: el contenido y la tensión de humedad dentro del bulbo húmedo, de manera que se puedan contabilizar estos valores en la dirección horizontal y vertical del bulbo húmedo.

Esto permitiría conocer el diámetro efectivo del bulbo de humedecimiento, dentro del cual, el estado de humedad será el correspondiente a la capacidad de campo, y por tanto la retención de humedad del suelo será la favorable para que el cultivo manifieste su mejor rendimiento. También permitirá asumir un porcentaje de solapamiento (a) adecuado y estimar por medio de (5), el área



would be easily usable by the plant. The effective radius that wetting the emitter will allow by means of (6) to estimate (Se).

For design purposes, it must be taken into account that the greater the volume of wet soil and therefore that explored by the roots, the lower the risk of hydric stress occurring in the plantations due to a fault in the installation that reduces the frequency of irrigation or due to an abnormal increase in (ETc) due to the consequences of Climate Change. The high frequency in drip irrigation, allows maintaining high humidity in the root zone, favouring the absorption of water by the roots, allowing the dedication of part of the metabolic energy to functions related to growth, development and increased yields.

This analysis, which is generally taken into account in the vertical direction of the wet bulb, also has application in the horizontal direction, towards the peripheries of the humid zones. When the humidity tension in the overlap of the wet bulbs is not taken into account, the dimension (s) in Figure 2 may be insufficient, causing less root activity in the intermediate zone between two consecutive plants. This situation can cause difficulties in the assimilation of the nutrients located in this zone and weaken the anchorage of the plant.

Regarding ( $T_R$ ), its influence on the operation of the installation has been demonstrated therefore is a defining parameter in the agronomic design of drip irrigation system. On some occasions, the duration of irrigation is assumed according to exploitation criteria, this parameter is directly related to (Ve), and the vertical advance of the humid areas, that is, as the time of application of the water increases, the lateral advance of the wet bulb stabilizes and the vertical one increases Li *et al.* (2003). The increase in the vertical advance of the humidity caused by an excessive duration of the irrigation can increase the losses by deep percolation, therefore, for the purposes of design it is not advisable to assume this parameter.

## CONCLUSIONS

- The combination of the field test procedure, with the procedure that takes into account the optimal moment of irrigation, coupled with software that simulates the distribution of moisture in the wet bulb, is promising and leads to establishing a rigorous procedure that promotes the rational agronomic design of a drip irrigation system.
- The vertical advance of moisture content caused by an excessive duration of irrigation can increase deep percolation losses; therefore, it is not convenient to assume this parameter for design purposes.
- Given that the humidity within the humid zone decreases towards the periphery, it is necessary to estimate the effective diameter of the humid bulb to guarantee that the humidity content in it is equivalent to the field capacity.
- If the distribution of the humidity generated by the emitters is known, the precise placement of water and nutrients in the root zone of the plants can be guaranteed, this is important for the assimilation of nutrients, the anchoring of the plants and the effectiveness of fertigation.

humedecida por el emisor, la cual sería fácilmente aprovechable por la planta. El radio efectivo que humedece el emisor permitirá por medio de (6) estimar la separación entre emisores (Se).

A los efectos del diseño, debe tenerse en cuenta que cuanto mayor sea el volumen de suelo mojado y por lo tanto el explorado por las raíces, menor será el riesgo de que se produzca un stress hídrico en las plantaciones debido a alguna avería en la instalación que haga disminuir la frecuencia de riego o por causa de un incremento anormal de (ETc) debido a las consecuencias del Cambio Climático. La alta frecuencia en el riego por goteo, permite mantener la humedad elevada en la zona radicular, favoreciendo la absorción de agua por las raíces, permitiendo dedicar parte de la energía metabólica a funciones relacionadas con el crecimiento, desarrollo y el incremento de los rendimientos.

Este análisis que generalmente es tenido en cuenta en la dirección vertical de la humedad, también tiene aplicación en el sentido horizontal, hacia las periferias de los bulbos húmedos, por el hecho de que cuando no se tiene en cuenta la tensión de humedad en el solape de los bulbos, la dimensión (s) de la Figura 2, puede resultar insuficiente, provocando que la actividad radicular disminuya en la zona intermedia entre dos plantas consecutivas, esta situación puede provocar dificultades en la asimilación de los nutrientes ubicados en esta zona y debilitar el anclaje de la planta.

Con relación a ( $T_R$ ), está demostrada su influencia en el funcionamiento de la instalación y es por lo tanto un parámetro definitorio en el diseño agronómico del sistema de riego. En algunas ocasiones, la duración del riego se asume de acuerdo a criterios de explotación, este parámetro guarda una relación directa con (Ve), y el avance vertical de las zonas húmedas, es decir, que conforme el tiempo de aplicación del agua aumenta, el avance lateral del bulbo húmedo se estabiliza y el vertical aumenta Li *et al.* (2003). El aumento del avance vertical de la humedad provocado por una duración del riego excesiva puede incrementar las pérdidas por percolación profunda, por ello, a los efectos de diseño no es conveniente asumir este parámetro.

## CONCLUSIONES

- La combinación del procedimiento que tiene en cuenta la prueba de campo y el procedimiento que tiene en cuenta el momento óptimo del riego, acoplados al software que simulan la distribución de humedad en el bulbo húmedo, es promisorio y conlleva a establecer un procedimiento que propicie el diseño agronómico racional de un sistema de riego por goteo.
- El avance vertical del frente húmedo provocado por una duración del riego excesiva puede incrementar las pérdidas por percolación profunda, por ello, a los efectos de diseño no es conveniente asumir este parámetro.
- Dado que la humedad dentro de la zona húmeda disminuye hacia la periferia es necesario estimar el diámetro efectivo del bulbo húmedo que garantice que el contenido de humedad en el mismo sea el equivalente a la capacidad de campo.
- Si se conoce la distribución de la humedad que generan los emisores, se puede garantizar la colocación precisa del agua y los nutrientes en la zona radicular de las plantas, esto es importante para la asimilación de nutrientes, el anclaje de las plantas y la eficacia del fertirriego.



- The depth at which soil moisture is verified, the number of emitters and their flow rate are parameters that allow defining if the chosen emitter distribution satisfies the minimum wetting percentage of the crop and demonstrate the relevance of the field-tests for the design of drip irrigation systems.
- La profundidad a la cual se verifica la humedad en el suelo, el número de emisores y el caudal de éstos son parámetros que permiten definir si la disposición de emisores elegida satisface el porcentaje de humedecimiento mínimo del cultivo y demuestran la pertinencia de las pruebas de campo para el diseño de sistemas de riego por goteo.

## REFERENCES

- ALLEN, G.R.; PEREIRA, S.L.; RAES, D.; SMITH, M.: *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Ed. FAO, Estudio FAO Riego y Drenaje 56 ed., vol. 56, pp. 300, ISBN-92-5-304219-2, Roma, Italia, 2006.
- AMIN, M.S.M.; EKHMAJ, A.I.M.: "DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator", En: *7th International micro irrigation congress, 10-16 Sept. 2006*, 2006.
- ARAPA, J.: *Manual de usuario. Aplicación y uso del software RIEGOLOC*, 2002.
- CRUZ, A.; DOMÍNGUEZ, M.: *Agricultura Cubana y Cambio Climático: ¿Coexistencia Imposible? (I)*, CITMA, La Habana, Cuba, 2014.
- CRUZ, B.F.; ÁLVAREZ, R.V.; CANO, R.P.; RIVERA, G.M.; SILLER, G.M.: "Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo", *Tecnología y ciencias del agua*, ISSN-2007-2422, 7(1): 45-55, 2016.
- CRUZ, B.F.; ZERMEÑO-GONZÁLEZ, G.A.; ÁLVAREZ, R.V.; CANO, R.P.; RIVERA, M.M.; SILLER, G.M.: "Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo", *Tecnología y ciencias del agua*, ISSN-2007-2422, 6(4): 131-140, 2015.
- DORTA, A.; VARGAS, P.: *Determinación del bulbo húmedo en Riego por Succión*, Tesis (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2017.
- JENSEN, M.E.; ALLEN, R.G.: *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements.*, Ed. Environmental and Water Resources Institute. ASCE, Second Edition ed., vol. Manual and Reports on Engineering Practice No. 70, pp. 20191 – 4382, Reston, Virginia, USA, 2016.
- KANDELOUS, M.; LIAGHAT, A.; ABBASI, F.: "Estimation of Soil Moisture Pattern in Drip Irrigation Using Dimensional Analysis Method", *Journal of Agricultural Science*, ISSN-0021-8596, 2008.
- KANDELOUS, M.M.; ŠIMŮNEK, J.: "Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation", *Irrigation Science*, ISSN-0342-7188, 28(5): 435-444, 2010.
- LI, J.; ZHANG, J.; LI, R.: "Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source", *Irrigation Science*, ISSN-1432-1319, 22(1): 19-30, 2003.
- MARTÍNEZ, B.J.: *Drenaje Agrícola y Medio Ambiente*, Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX, Madrid, España, 2001.
- NAFCHI, R.F.; MOSAVI, F.; PARVANAK, K.: "Experimental study of shape and volume of wetted soil in trickle irrigation method", *African Journal of Agricultural Research*, ISSN-1991-637X, 6(2): 458-466, 2011.
- SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.T.: "Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions", *Journal of hydrology*, ISSN-0022-1694, 251(3-4): 163-176, 2001.
- SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B.: "Emitter spacing and geometry of wetted soil volume", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ISSN-0733-9437, 112(3): 242-253, 1986.
- SELLÉZ, V.G.; FERREIRA, E.R.: *Diplomado de Riego Tecnificado*, Universidad de Santo Tomás, Santiago de Chile, Chile, 2002.
- UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS: *3er Diplomado de Riego Tecnificado. Curso de Hidráulica Aplicada*, Universidad Santo Tomás, Corporación Santo Tomás, Santiago de Chile, Chile, 2003.

*Pável Vargas-Rodríguez*, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba, e-mail: [p Vargas@uo.edu.cu](mailto:p Vargas@uo.edu.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3316-0898>

*Abel Dorta-Armaignac*, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba, e-mail: [abel@uo.edu.cu](mailto:abel@uo.edu.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4093-971X>

*Kaddiel Fernández-Hung*, Especialista, Grupo de Difusión Tecnológica Empresa de Cítricos Contra maestre, Santiago de Cuba, Cuba, e-mail: [opp1@geditec.co.cu](mailto:opp1@geditec.co.cu); [kfdezjh@gmail.com](mailto:kfdezjh@gmail.com) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5114-7948>

*Alberto Méndez-Jocik*, Jefe del Departamento de Diseño, Empresa de Proyectos Ingeniería, La Habana, Cuba, e-mail: [joc4263@gmail.com](mailto:joc4263@gmail.com) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7906-8398>

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.