

## ARTÍCULO ORIGINAL

# Diseño de un sistema de drenaje subsuperficial a pequeña escala para la remoción de zinc en suelos agrícolas de Almolonga en Guatemala

## Design of a subsurface drainage system for small-scale removal of zinc in agricultural soils Almolonga in Guatemala

Ovidio Anibal Sacbajá<sup>1</sup>, Oscar Brown Manrique<sup>2</sup>; Jorge Armengol Rodríguez<sup>3</sup> y Albi Mujica Cervantes<sup>2</sup>

**RESUMEN.** El presente trabajo expone los resultados de un sistema de drenaje subsuperficial a pequeña escala para la remoción de zinc en suelos agrícolas destinado para la producción hortícola en el valle de Almolonga en Guatemala. El sistema abarca un área típica de una hectárea en el que se aplican tres láminas de 8, 16 y 32 mm de agua y se basa en la ecuación de Hooghoudt para el flujo establecido con valores de conductividad hidráulica de 1,46 m/d, capa impermeable a una profundidad de 3 m, norma de drenaje de 70 cm, elevación máxima del nivel freático por encima del dren de 30 cm y tiempo que soporta el cultivo sin sufrir daños de 5 días. A partir de estos parámetros se obtiene la profundidad de colocación del dren de un metro y distancia del dren al estrato impermeable de 2 m. La investigación deduce para estas condiciones funciones estadístico matemáticas del tipo lineal y potencial que relaciona la lamina de agua aplicada con el caudal específico, la distancia entre drenes y el caudal captado por los drenes, con un área promedio equivalente para la entrada de agua de 15 mm<sup>2</sup> mediante perforaciones rectangulares de 3 mm x 5 mm que permite garantizar 157 aberturas por metro de tubo.

**Palabras clave:** drenaje subsuperficial, remoción de zinc, producción hortícola.

**ABSTRACT.** This paper presents the results of a subsurface drainage system for small-scale removal of zinc in agricultural soils for horticultural production for the Almolonga Valley in Guatemala. The system comprises a typical area of one hectare applied in three layers of 8, 16 and 32 mm of water and is based on the Hooghoudt equation for the established flow with hydraulic conductivity of 1.46 m/d, impermeable layer at a depth of 3 m, standard drain 70 cm, maximum water table elevation above drain 30 cm, flood allowable time of 5 days. From these parameters we obtain the drain placement depth of five feet distance from drain to impermeable layer of 2 m. The investigation propose for these conditions statistical- mathematics functions that relates the applied water depth to the specific flow, the distance between drains and flow captured by the drains, average equivalent area to the entry of water of 15 mm<sup>2</sup> and rectangular holes of 3 mm x 5 mm which ensures 157 openings per meter of pipe.

**Keywords:** subsurface drainage, removal of zinc, horticultural production.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo es la degradación química que provoca pérdidas parciales o totales de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en concentraciones que superan el poder de amorti-

guación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades (Macías, 1993).

El agua potable contiene cierta cantidad de zinc que puede incrementarse en los ecosistemas, debido a deficiencias en el proceso de depuración en plantas de tratamiento de aguas; pues los efluentes poseen alta presencia de zinc

**Recibido** 15/07/11, aprobado 10/09/12, trabajo 73/12, artículo original.

<sup>1</sup> Profesor de La Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala, E-✉: [obrown@ingenieria.unica.cu](mailto:obrown@ingenieria.unica.cu)

<sup>2</sup> Dr.C., Profesor Titular, Centro de Estudios Hidrotécnicos (CEH). Facultad de Ingeniería. Universidad Máximo Gómez Báez de Ciego de Ávila, Carretera a Morón, km 9 ½, Ciego de Ávila, Cuba, C.P. 69450. Tel.: 2-5702; Fax: 236365.

<sup>3</sup> Profesor de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.

que frecuentemente es depositado por los ríos en los terrenos aledaños a través de los lodos contaminados con este elemento (Lenntech, 2011).

El zinc es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas; sin embargo, los niveles excesivos en el suelo producen serias afectaciones por sus efectos tóxicos para las plantas y los organismos del suelo; pues se vuelve nocivo cuando se presenta en concentraciones elevadas (Ortiz *et al.*, 2007). En este sentido Taylor y Demayo (1980); OMOE (1984); Williamson (1988) y CCME (1993) sugieren concentraciones en aguas de riego de 2 a 10 mg/L de zinc, lo que se considera un valor apropiado para evitar que las plantas sufran por déficit de este elemento.

La agricultura intensiva en el valle de Almolonga en Guatemala basada en el uso de dosis altas de fertilizantes nitrogenados, fosfatados y plaguicidas con base de zinc, arsénico, cadmio, plomo, cobre, manganeso y abonos de origen animal y vegetal, han contaminado el suelo con metales pesados, particularmente zinc, el cual puede acumularse en el perfil de suelo.

Sacabajá, 2010 en estudios de campo y laboratorio realizados en la Universidad San Carlos de Guatemala definió tres láminas de riego para la remoción del zinc (8, 16 y 32 cm) que permiten la evacuación de este elemento en cantidades que oscilan entre 787 hasta 17862 g/ha, según las características de los suelos de esta zona hortícola; es por ello que el objetivo del trabajo consiste en el diseño de un sistema de drenaje subsuperficial a pequeña escala para reducir la concentración excesiva de este elemento del perfil de suelo.

**MÉTODOS**

El estudio se realizó en el municipio de San Pedro Almolonga, ubicado en el departamento de Quetzaltenango en el occidente del país. Posee una extensión de 20 km<sup>2</sup> de los cuales 1,04 km<sup>2</sup> lo constituye el valle de Almolonga, que es utilizado en el cultivo de hortalizas para su comercialización en diferentes departamentos de Guatemala y países como El Salvador, Honduras y frontera con México. Las áreas de cultivo en este valle van desde 218 m<sup>2</sup> hasta 870 m<sup>2</sup> como máximo sobre un suelo andosol de textura media.

El diseño del sistema de drenaje subsuperficial a pequeña escala propuesto abarca un área típica de una hectárea en la que se aplican tres láminas de 8,16 y 32 cm de agua para la remoción de zinc por debajo de una capa de 15 cm de suelo. El mismo se basa en la ecuación de Hooghoudt para el flujo establecido, igualdad de las conductividades hidráulicas por arriba y por debajo de los drenes con valor de 0,66 m/d y la presencia de una capa impermeable a una profundidad de 3,5 m.

El caudal específico se determina como:

$$q = \frac{L_a}{t} \tag{1}$$

donde:

- q - Caudal específico, m/d;
- L<sub>a</sub> - Lámina de agua aplicada para la remoción del zinc, mm;
- t - Tiempo que soporta el cultivo sin sufrir daños, día.

La ecuación de Hooghoudt para la determinación de la separación entre los drenes se escribe de la forma siguiente:

$$E = \left[ \frac{4K.H(H + 2d)}{q} \right]^{0.5} \tag{2}$$

$$d = T - P \tag{3}$$

$$P = Z + H \tag{4}$$

donde:

- E - Separación entre los drenes, m;
- K - Conductividad hidráulica, m/d;
- d - Distancia del dren al estrato impermeable, m;
- T - Profundidad del estrato impermeable, m;
- P - Profundidad de colocación del dren, m;
- Z - Norma de drenaje, m;
- H - Elevación máximas del nivel freático por encima del dren, m.

La velocidad del agua considerando el dren lleno se estima por la formula de Vicent según Poiree y Ollierm (1966).

$$v = \left( \frac{50\phi.\Delta h}{50\phi + 100} \right)^{0.5} \tag{5}$$

$$\Delta_h = 100S_o \tag{6}$$

donde:

- v - Velocidad del agua en el dren a tubo lleno, m/s;
- k<sub>d</sub> - Coeficiente en función del diámetro del dren.
- Φ - Diámetro del dren, m;
- Δ<sub>h</sub> - Desnivel del dren por cada 100 m;
- S<sub>o</sub> - Pendiente del terreno, m/m.

El caudal máximo captado por el dren se determina para un área unitaria de una hectárea considerando una longitud colectora de 100 m.

$$Q_{max} = 0.0116.q.L.E \tag{7}$$

donde:

- Q<sub>max</sub> - Caudal máximo captado por el dren, L/s;
- q - Caudal específico, m/d;
- L - Longitud colectora del dren, m;
- E - Separación entre los drenes, m.

El número aberturas por metro de tubo se calcula según la expresión siguiente:

$$N_{ab} = \frac{A_{ud}}{A_{ab}} \tag{8}$$

$$A_{ud} = P_d.L_{ud} \tag{9}$$

$$P_d = 2\pi r \tag{10}$$

donde:

- $N_{ab}$  - Numero de aberturas por metro de tubos;
- $A_{ud}$  - Área unitaria del dren,  $cm^2$ ;
- $A_{ab}$  - Área de una abertura ( $cm^2$ );
- $P_d$  - Perímetro del dren,  $cm$ ;
- $L_{ud}$  - Longitud unitaria del dren,  $cm$ ;
- $r$  - Radio del dren,  $m$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el sistema de drenaje propuesto se define que la norma de drenaje es de 50  $cm$ , fijada a partir del espesor de la zona aireada; la elevación máxima del nivel freático por encima del dren es de 30  $cm$  y el tiempo que soporta el cultivo sin sufrir daños es de 5 días. Estos parámetros son los apropiados para el suelo Andosol que es el tipo predominante en el valle de Almolonga y coincide con los propuestos por Vigoa (1983) para

el lavado de suelos de textura media utilizados en el cultivo de vegetales. A partir de estos valores se determinan los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

**TABLA 1. Parámetros de diseño**

Profundidad de colocación del dren, $P$ , $m$	0,80
Distancia del dren al estrato impermeable, $d$ , $m$	2,70
Desnivel del dren por cada 100 metros, $\square_h$ , $m$	0,30
Velocidad del agua en el dren a tubo lleno, $v$ , $m/s$	0,36

El caudal específico en  $m/d$  se determinó para las tres láminas de agua estudiadas, obteniéndose valores de 0,016, 0,032 y 0,064  $m/d$  (Figura 1) que responde a una relación funcional lineal con un coeficiente de determinación perfecto expresada como:

$$q = 0.0002L_a \tag{11}$$

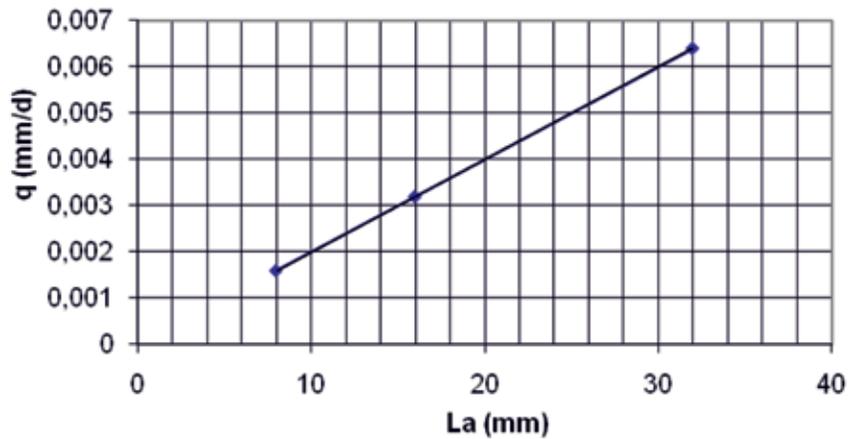


FIGURA 1. Relación entre lámina de riego y caudal específico.

El espaciamiento entre los drenes para una hectárea fue de 16,80, 11,80 y 8,40  $m$  para las diferentes láminas evaluadas (Figura 2), al relacionar ambos parámetros se obtiene una función radical con un coeficiente de determinación de 0,998.

$$E = \frac{194}{\sqrt{L_a}} \tag{12}$$

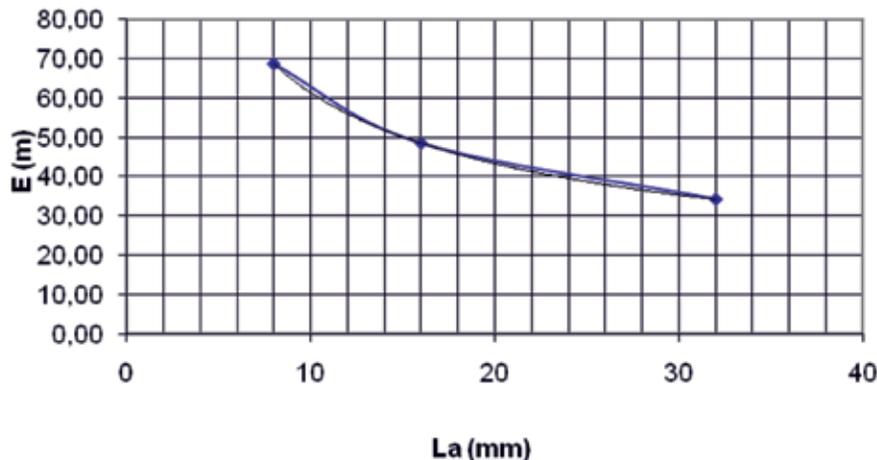


FIGURA 2. Relación entre lámina de riego y separación entre drenes.

El sistema propuesto utiliza drenes con diámetros de 100 mm, coincidiendo con el criterio de Vigoa (1983) quien opina que las tuberías de drenaje más utilizadas presentan diámetros que oscilan entre 60 y 100 mm por razones económicas. Considerándose la pendiente natural del terreno de 4% y un coeficiente  $k_a$  de 0,83 obtenido por Vigoa (1983), en función del diámetro del dren y una longitud colectora de 100 m, se obtiene que la velocidad del agua dentro del dren es de 0,36 m/s que permite un caudal máximo de 20,03, 14,17 y 10,02 L/s en correspondencia con las tres láminas de riego evaluadas para la remoción del zinc (Figura 3). En este caso se obtiene una función potencial con un coeficiente de determinación de 0,995 para los dos últimos parámetros señalados.

$$Q_{\max} = 51.85L_a^{-0.5} \tag{13}$$

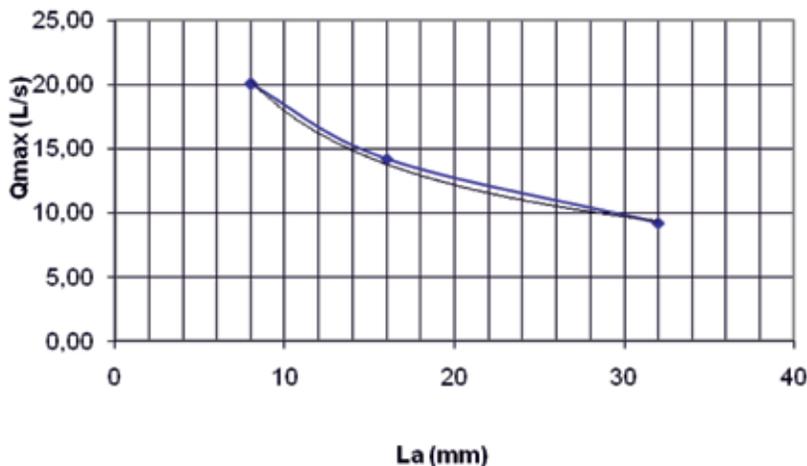


FIGURA 3. Relación entre lámina de riego y caudal máximo.

Las ecuaciones 11, 12 y 13 deducidas en esta investigación permiten estimar acertadamente el caudal específico, el espaciamiento entre drenes y el caudal máximo captado por el dren en un sistema de drenaje a pequeña escala con las características expuestas anteriormente. Estas expresiones pueden aplicarse para la remoción de zinc mediante el drenaje subterráneo, que contribuye a incrementar la producción de los cultivos (Nosenko y Zonn, 1976).

Para garantizar la captación del agua aplicada para la remoción de zinc se propone un área promedio equivalente para la entrada de agua al conducto de 15 mm<sup>2</sup> mediante perforaciones rectangulares de 3 x 5 mm que permite garantizar 157 aberturas por metro de tubo. Estos parámetros de diseño determinados a partir de datos experimentales medidos en el área de estudio serían insuficientes para evitar posibles inconvenientes en el funcionamiento del sistema, si no se toman las medidas adecuadas para el control de calidad durante la instalación y por supuesto en el manejo durante la fase de explotación (Ritzema, 1994).

## CONCLUSIONES

- En el sistema de drenaje subsuperficial propuesto se determina la norma de drenaje de 50 cm, elevación máxima del nivel freático por encima del dren de 30 cm y tiempo permisible de inundación de 5 días.
- Con la aplicación de láminas de agua de 8,16 y 32 cm se obtuvo un caudal específico de 0,016, 0,032 y 0,064 mm/d y espaciamiento entre los drenes de 16,80, 11,88 y 8,40 m.
- Se deducen para las condiciones del área de estudio tres funciones estadístico matemáticas del tipo lineal y potencial que relaciona la lámina de agua aplicada con el caudal específico, la distancia entre drenes y el caudal captado por los drenes.
- Los drenes funcionarán con 100 mm de diámetros, área promedio equivalente para la entrada de agua al conducto de 15 mm<sup>2</sup> y perforaciones rectangulares de 3 x 5 mm que permiten garantizar 314 aberturas por metro de tubo.
- La velocidad del agua dentro del dren es de 0,36 m/s para la captación de un caudal máximo de 6,94, 4,91 y 3,47 L/s en correspondencia con las tres láminas de riego evaluadas para la remoción del zinc.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CCME: *Guidance Manual on Sampling, Analysis, and Data Management for Contaminated Sites*, Volume II: Analytical Method Summaries, Canada, 1993.
- LENNTECH: *Cinc (Zn) y agua*, Revista Mater Treatment Solution [en línea] mayo, 2008. Disponible en: <http://www.lennotech.es/periodical/elementos/zn.htm> [Consulta: octubre, 29 2011].
- MACÍAS, F.: Contaminación de suelos: algunos hechos y perspectivas, Ortiz Silla, R., (Ed.), Problemática Geoambiental y Desarrollo, Tomo I. En: **V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio**, pp. 53-74, Murcia, España, 1993.
- NOSENKO, P. P. & S. ZONN: *Land Drainage in the World*, pp. 1-3, ICID Bulletin 25, 1, pp. 65-70, India, 1976.
- OMOE: *Guidelines for the Protection of Agricultural Water Uses*, Canadian Water Quality. Cyanazine, Winnipeg., Canada, 1984.

ORTIZ, I.; J. SANZ; M. DORADO y S. VILLAR: *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*, 109pp., Informe de vigilancia tecnológica, Universidad de Alcalá, Comunidad de Madrid, España, 2007.

RITZEMA, H. P.: *Drainage Principles and Applications*, Publication 16, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen, ISBN 90 70754 3 39, Netherlands, 2006.

RITZEMA, H. P.: *Drainage principles and applications*, ILRI. Publication 16, Second Edition. Wageningen, Netherlands, 1994.

SACBAJÁ, A.: *Análisis de los contenidos de metales pesados y su influencia sobre la calidad del agua de riego en el valle hortícola de Almolonga, Quetzaltenango, Guatemala*, 30pp., Informe de cumplimiento de la fase I. Proyecto Red CARA, USAC, Guatemala, 2010.

TAYLOR, M.C. & A. DEMAYO: *Zinc*, In: Guidelines for surface water quality, Vol. I, Inorganic chemical substances. Environment Canada, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa, Canada, 1980.

WILLIAMSON, B. E.: *Matrix-isolation magnetic circular dichroism and absorption spectra of zinc phthalocyanine*, University of Wisconsin, Madison, WI, Synchrotron Research Center User's Group Meeting, USA, 1988.

VIGOA, R.: "Aplicaciones del drenaje subsuperficial agrícola", Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, *Revista Ingeniería Hidráulica*, 3(3): 272-282, 1983.

**Logos representativos**  
de las diferentes secciones  
que usted encontrará en la  
**Revista Ciencias Técnicas**  
**Agropecuarias**



Máquinas a Prueba

Mecanización Pecuaria



Explotación y Procesos Mecanizados

Tracción Animal



Agricultura de Precisión

Reparación y Tecnología Mecánica



Tractores y Máquinas Agrícolas

Electrificación y Construcciones Rurales



Utilización de la Energía en la Agricultura

Computación y Matemática Aplicada



Suelo y Agua

Docencia y Capacitación



Oleohidráulica

Agricultura Conservacionista



Postcosecha

**Suscríbase**