

Diseño de un Sistema Electrónico Digital para Automatizar la Prueba de Capacidad de Infiltración del Suelo en Campo

Design of an Electronic Digital System to Automate the Soil Test of Infiltration Capacity in Field

Yamil Armando Cerquera¹, Guillermo Andrés López² y Leidy Johanna Ramos³

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema electrónico digital que automatiza el método de infiltrómetro de anillos, el cual es utilizado para obtener la capacidad de infiltración del suelo. Se emplea un sensor ultrasónico de distancia el cual tiene la función de observador de la lámina de agua infiltrada durante el desarrollo de la prueba. De igual manera se utiliza una electroválvula junto con un tanque abastecedor, encargados de realizar el proceso de recarga de la lámina de agua para que el nivel se mantenga constante, como es ideal. El manejo de estos periféricos se realiza a través una tarjeta de control que posee como elemento central un microcontrolador dsPIC. Para la recopilación, el análisis y la interpretación de los datos de la prueba se desarrolla un software denominado InfilSuelos V. 1.0, diseñado en el entorno de programación de Visual Basic 6.0 con el que se crea un entorno gráfico amigable y fácil de manejar. Para comprobar la efectividad del prototipo automatizado se efectuaron tres pruebas en distintos sitios, buscando variedad en el tipo de suelo. Al comparar las tablas de datos recogidos entre el proceso automatizado y el proceso manual se obtuvo un error máximo del 12%.

Palabras Clave: Infiltrómetro de Anillos; Sensor Ultrasónico de Distancia; Microcontrolador dsPIC.

Abstract

In this project it was performed the prototype of an electronic digital system that automates the method of infiltrometer rings which is used to obtain the soil infiltration capacity. It uses an ultrasonic distance sensor which has the function of observer of the water blade infiltrated during the development of the test. In the same way, it was used a solenoid with a supplier tank, them charge of make the recharging process of the water blade to the level remains constant, like it's ideal. The management of these peripherals is done through a control card that has as central element a dsPIC microcontroller. For the collection, analysis and interpretation of test is developed a software called InfilSuelos V. 1.0, designed in the programming environment of Visual Basic 6.0 which creates a friendly graphical interface and easy to handle. To test the effectiveness of the prototype automated three tests were conducted at various sites, looking for variety in the type of soil. By comparing the tables of data collected from the automated process and manual process yielded a maximum error of 12%.

Keywords: Infiltrometer Rings; Ultrasonic Distance Sensor; dsPIC Microcontroller.

¹ Ingeniero Electrónico. Docente Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana – Carrera 1. yacerque1@hotmail.com ² Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana – Carrera 1. guian85@hotmail.com

³ Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana – Carrera 1. joharamo@hotmail.com

1. Introducción

La infiltración del agua en el suelo es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico y afecta de forma relevante a la productividad y sostenibilidad de la agricultura, ya que su reducción conduce a efectos no deseados tales como el incremento de la escorrentía superficial, la erosión del suelo, la pérdida de agroquímicos y la disminución de las reservas de agua en el suelo (Amézketa et al., 2002).

Cada suelo tiene una tasa de infiltración característica que depende de sus propiedades intrínsecas, pero también del manejo del suelo y del agua de riego, así como de ciertos factores climáticos como la lluvia y el viento. La caracterización de la tasa de infiltración de los suelos es fundamental no sólo para el diseño y el manejo apropiado de los sistemas de riego, sino también para detectar las pérdidas de estabilidad estructural, cuantificar la susceptibilidad de los suelos al sellado superficial o encostramiento y estimar ciertas propiedades físicas del suelo tales como la distribución del tamaño de poros o el transporte de agua y solutos (Reynolds y Elrick, 1990; Wang et al., 1998; Angulo-Jaramillo et al., 2000).

Existen diversos métodos para establecer la velocidad de infiltración del suelo, dentro de los que se encuentra el infiltrómetro de anillos. Esta técnica además de ser una de las más antiguas y económicas suele ser una de las más utilizadas debido a su buena relación entre simplicidad y efectividad. Aunque este método es sencillo de realizar demanda tiempo e incomodidad para el operador, el cual debe estar leyendo y registrando las medidas de descenso de la lámina de agua que va infiltrando el suelo, además de estar pendiente de la recarga de agua en el anillo. Esto implica que dicha persona esté aproximadamente dos horas continuas (tiempo que normalmente dura la prueba) en campo abierto, bajo las inclemencias del clima. A la incomodidad que sufre el operador se le debe sumar el error que se suele presentar en las medidas por el carácter subjetivo que tiene la lectura de éstas.

La Unidad de Suelos y Riegos del SIA-DGA en colaboración con el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA) en el año 2002, desarrolló un infiltrómetro automatizado del que se reprodujeron 18 unidades las cuales fueron utilizadas en la determinación de la infiltración característica de siete suelos de la cuenca media del Ebro en la ciudad de Zaragoza, España. En la composición del sistema se usó elementos mecánicos los cuales hacen que éste sea más susceptible a fallos (Amézketa et al., 2002).

Buscando reducir las desventajas que posee el método de infiltrómetro de anillos, se diseñó una unidad electrónica automatizada que además de realizar la lectura de los datos en unidades de decimas de milímetro (mayor precisión) y encargarse de la recarga de la lámina de agua, cuenta con un software con un entorno didáctico y funcional que analiza, procesa e interpreta los datos de la prueba proporcionando los valores de infiltración acumulada con su respectiva gráfica, al igual que los valores de infiltración instantánea y básica.

2. Metodología

2.1 Estudio de la velocidad de infiltración del suelo y el método de anillos infiltrómetros

El diseño del prototipo automatizado del método de infiltrómetro de anillos se inició con el estudio del proceso de infiltración del suelo y la obtención de la velocidad de infiltración a partir de la técnica de anillos infiltrómetros que consiste en dos cilindros (o anillos) metálicos concéntricos que se clavan unos centímetros en la superficie del suelo y se inundan con agua. A medida que el agua se va infiltrando en el suelo se van tomando medidas simultáneas de volumen infiltrado y tiempo, normalmente hasta que la velocidad de infiltración es constante (Santa Olalla Mañas, 2005). La limitación más seria para el uso de cilindros es su ubicación en el suelo, que produce un cierto grado de alteración de las condiciones naturales (destrucción de la estructura y compactación); ello produce a su vez gran variación en las velocidades de infiltración (Gurovich, 1985). El método permite estimar los parámetros de las ecuaciones para la infiltración de Kostiakov. La altura de agua dentro del cilindro puede mantenerse constante o no, como variantes del método.

Como la velocidad de infiltración comienza con un valor relativamente alto y decrece con el tiempo, puede ser expresada, según Kostiakov (1932) de la siguiente forma:

$$i = KT^n \quad -1 < n < 0 \quad \text{Donde:}$$

i es la velocidad de infiltración instantánea.

T es el tiempo en minutos.

K es la constante que representa la velocidad de infiltración para $T = 1$ minuto.
 n es la pendiente de la curva de la velocidad de infiltración con respecto al tiempo. La infiltración acumulada, se obtiene integrando la ecuación de velocidad de infiltración:

$$l = \int_0^T i \, dT$$

Donde:

l es la infiltración acumulada o lámina de agua acumulada (L).

Al resolver esta ecuación la infiltración acumulada resulta:

$$l = KT^m \quad 0 < m < 1$$

Donde:

K es la lámina de agua acumulada en el perfil del suelo cuando $T = 1$ minuto.
 m es la pendiente de la curva de infiltración acumulada versus el tiempo $l = f(T)$.

Al comparar esta ecuación con resultados de las experiencias realizadas, los datos que se obtienen se ajustan moderadamente bien a las determinaciones prácticas, dado que los parámetros de la ecuación son evaluados a partir de mediciones experimentales únicamente (Torrente et. al., 1998). Se realizaron tres pruebas, cada una en un predio diferente ubicado en el casco urbano de la ciudad de Neiva con el fin de determinar la respectiva capacidad de infiltración del suelo.

2.2 Elección y descripción de los elementos a utilizar en el sistema

Partiendo de las especificaciones típicas del método manual para determinar la velocidad de infiltración mediante el uso de los anillos infiltrómetros se determinó que el prototipo automatizado debería tener las siguientes características:

- El dispositivo debe ser alimentado por baterías, puesto que se trata de una prueba que se realiza en campo abierto donde no se tiene fácil acceso a fuentes de energía.
- El dispositivo debe tener una autonomía de trabajo de mínimo dos horas, y a la prueba manual tarda aproximadamente ese tiempo. Existen casos extremos donde la prueba tiene una duración menor ya que la lámina de agua se infiltra de manera inmediata o por el contrario permanece casi intacta en el transcurso del tiempo. Media hora de prueba es suficiente para distinguir estos comportamientos extremos.
- Debe existir un proceso de recarga inmediato de la lámina de agua infiltrada con el fin de mantenerla constante para evitar la alteración de los resultados de la prueba.
- El nivel de agua inicial en el anillo central es variable, ya que los anillos no tienen medidas estandarizadas.
- Las lecturas de la lámina de agua infiltrada se realizan en unidades de milímetros.
- Se deben realizar los cálculos necesarios para determinar la velocidad de infiltración del suelo que se está analizando.

Se realizó un sistema que consta de dos partes fundamentales: primero, una tarjeta de control a la cual se conectan los dispositivos seleccionados para realizar la automatización de la prueba de infiltración de suelos. En segundo lugar un software diseñado con funciones específicas de la prueba, según requerimientos del personal del laboratorio de suelos de la Universidad Surcolombiana.

2.2.1 Tarjeta de control

Se diseñó una tarjeta de control para el sistema, de la cual dependen los demás dispositivos que intervienen en la automatización de la prueba de infiltración de suelos. La tarjeta está conformada por siete bloques, como se observa en la figura 1.



Figura 1. Diagrama de bloques de la tarjeta de control.

a. Sensor ultrasónico de distancia:

Para la elección de este dispositivo se tuvieron en cuenta las siguientes características técnicas:

- 1) Medición de distancia.
- 2) Rango aproximado de 1cm a 4m.
- 3) Voltaje D.C de 5V o menos y consumo de corriente en el orden de 30mA.
- 4) Peso y tamaño reducidos.

Se eligió el sensor ultrasónico SRF05, el cual se adapta a las necesidades requeridas. Es el encargado de realizar las medidas de descenso de la lámina infiltrada de agua, de esta manera nos brinda las lecturas necesarias para la determinación de la velocidad de infiltración del suelo y además nos permite saber en qué instante se debe hacer la recarga de agua en el anillo infiltrómetro.

b. Teclado:

Se utilizó un teclado de membrana de 4 filas y tres columnas (4x3), el cual se conectó a un puerto análogo del microcontrolador, haciendo uso del conversor análogo digital del mismo. De acuerdo a las lecturas del conversor análogo se establecen valores determinados al pulsar cada una de las teclas que permiten al usuario elegir lo que desea realizar según su necesidad.

c. Microcontrolador:

Para la elección de este dispositivo se tuvieron en cuenta las siguientes características técnicas:

- 1) Gran flexibilidad en su programación.
- 2) Varios puertos de entrada y salida.
- 3) Canales de conversión A/D de 16 bits.
- 4) Módulos de comparación, captura, comunicación i2c, usart, spi y can.
- 5) Memoria eeprom interna de 1024 bytes.
- 6) Timers de 16 bits.

El microcontrolador de referencia dsPIC 30F4012 se adapta a las necesidades requeridas. Por tal razón fue utilizado como núcleo central de la tarjeta de control a partir del cual se dan las órdenes de las tareas a realizar por cada uno de los dispositivos del sistema.

d. Pantalla LCD.

Para la elección de este dispositivo se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- 1) Buena visibilidad
- 2) Bajo costo.

Se usó una pantalla LCD alfanumérica de 20 columnas x 4 filas (20 x 4), la cual se adapta a las necesidades requeridas. A través de esta pantalla se mantiene informado al usuario acerca de los procesos que realiza el microcontrolador y las órdenes que éste da a los demás dispositivos externos gobernados por él.

e. Electroválvula:

Para la elección de este dispositivo se tuvieron en cuenta las siguientes características técnicas:

- 1) Alimentación D.C y bajo consumo de potencia.
- 2) Presión de funcionamiento desde 0 psi (*pounds per square inch*) o libras por pulgada cuadrada.
- 3) Gran capacidad de caudal.

Se eligió una válvula solenoide marca ASCO de referencia 8210G094-12VDC de fabricación mexicana, la cual se adapta a las necesidades requeridas. Se encarga de permitir el paso de agua desde un tanque de abastecimiento para mantener el nivel de la lámina de agua constante dentro del anillo infiltrómetro, siendo esta una condición primordial para la efectiva realización de la prueba.

f. Cable para comunicación serial:

Para la elección de este dispositivo se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- d.** Fácil adquisición.
- e.** Conversión serial a USB.

De esta manera se utilizó un cable de datos de referencia DKU-50 para celulares Nokia, el cual se adapta a las necesidades requeridas. Se encarga de realizar la conversión de serial a USB para fácil conexión del prototipo a cualquier computador para la transferencia de los datos desde éste hacia el software InfilSuelos V. 1.0.

g. Fuentes de alimentación:

En primer lugar se debe aclarar que el sistema utiliza dos sistemas de alimentación independientes. Uno que alimenta todos los componentes que se comunican directamente con el microcontrolador en la tarjeta de control y otro que hace parte del circuito de potencia que activa la electroválvula. Esto con el propósito de mantener aislados estos sistemas y evitar posibles daños. Para el primer sistema de alimentación se eligió una batería de iones de litio de 9V recargable y para el segundo sistema una batería seca de 12V / 7Ah recargable, las cuales se adaptan a las necesidades requeridas.

2.2.2 Software de procesamiento, análisis e interpretación de datos

Para el diseño de este programa se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- 1) Ejecución de cálculos de infiltración.
- 2) Realización y visualización de gráficas.
- 3) Interfaz de comunicación serial para transmisión de datos.
- 4) Creación y manejo de archivos de texto.

Se desarrolló el software InfilSuelos V. 1.0 realizado en el entorno de programación Visual Basic 6.0, el cual se adapta a las necesidades requeridas. Es un software diseñado para la interpretación de los datos de la prueba de infiltración mediante infiltrómetro de anillos. Ofrece el cálculo de la Infiltración Instantánea y la Infiltración Básica de los diferentes tipos de suelo, además de brindar la gráfica de Infiltración Acumulada con su respectiva ecuación. Permite hacer la conexión serial del PC con el dsPIC para recibir los datos de la prueba, necesarios para realizar la gráfica y los cálculos. Este consta de una sola ventana de entorno que se muestra en la figura 2.

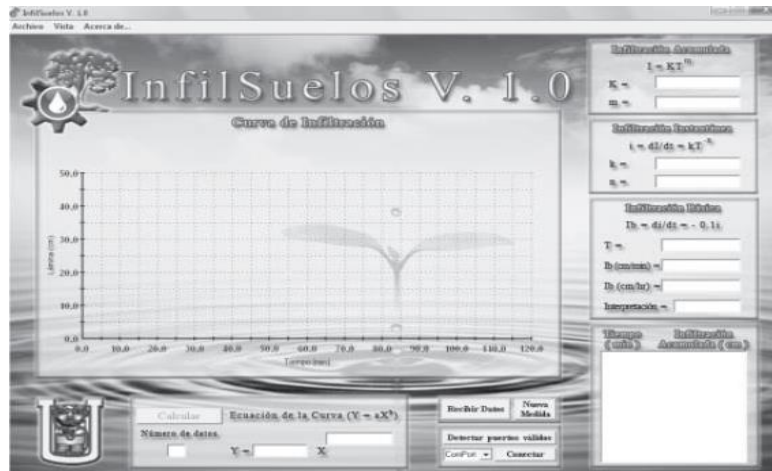


Figura 2. Ventana de entorno del software InfilSuelos V. 1.0.

Al software se transfiere una tabla de datos obtenida mediante la tarjeta de control, de la realización de la prueba de infiltrómetro de anillos. La tabla que se muestra en la figura 3 contiene dos columnas, la primera de ellas es el tiempo correspondiente a cada medida y la segunda es la infiltración acumulada calculada por el microcontrolador en cada uno de estos tiempos. La tabla de datos vista desde la ventana del software se muestra en la figura 3.

Tiempo (min)	Infiltración Acumulada (cm)
1	1
2	1.6
3	2.3
4	2.7
5	3.2
10	6
15	8.4
30	15.7
45	23.1
60	29.1
90	39.2
120	50

Figura 3. Tabla de datos obtenida de la prueba.

El software permite guardar la tabla mostrada en la figura 3 en un archivo de texto para luego ser procesada y analizada. Al abrir el archivo desde el software se genera la gráfica de la velocidad de infiltración del suelo y los cálculos de la infiltración instantánea, infiltración acumulada e infiltración básica con su respectiva interpretación.

2.3 Diseño final del prototipo automatizado

Teniendo claro los dispositivos necesarios para la automatización de la prueba manual de anillos infiltrómetros pasamos a realizar el diseño del sistema. En la figura 4 se muestra gráficamente el diagrama funcional del sistema donde se aprecia la conexión y ubicación de los dispositivos especificados anteriormente.

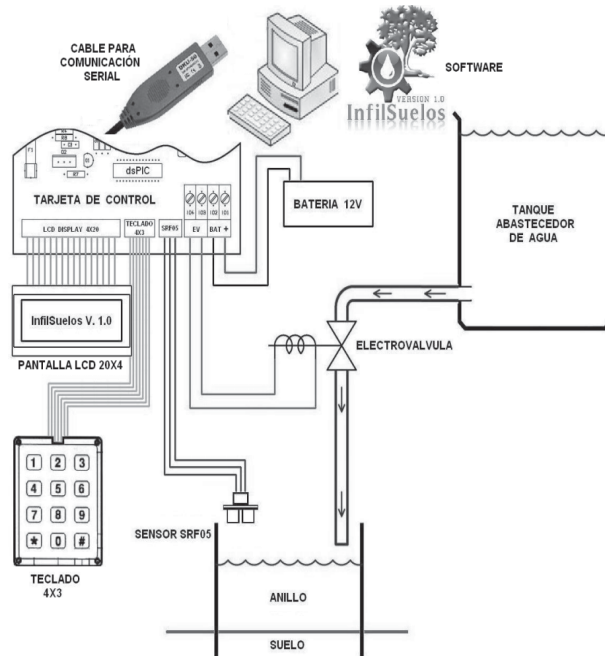


Figura 4. Diagrama funcional del sistema.

En la figura 5 se presenta la fotografía de la implementación física del prototipo automatizado.



Figura 5. Implementación física del prototipo automatizado.

3. Resultados

La infiltración en el suelo se clasifica de acuerdo a la tabla 1 (Castro, 2009). En la tabla 2 se presenta la relación de predios en los que se realizaron las pruebas.

Tabla 1. Clasificación de la infiltración en el suelo.

Clase	Denominación	Rango (mm/hr)	Rango (cm/min)
1	Muy Rápida	> 254	> 0.4233
2	Rápida	127 - 254	0.2116 - 0.4233
3	Moderadamente Rápida	63 - 127	0.1050 - 0.2116
4	Moderadamente	20 - 63	0.0333 - 0.1050
5	Moderadamente Lenta	5 - 20	0.0083 - 0.0333
6	Lenta	1 - 5	0.0016 - 0.0083
7	Muy Lenta	< 1	0.0016

Tabla 2. Numeración y ubicación de predios donde se realizaron las pruebas de infiltración.

Pedio	Ubicación
1	Manzana G, Barrio El Pinal.
2	Calle 20A con Carrera 47A, Urbanización Villas de San Fernando.
3	Av. Pastrana Borrero Carrera 1, Facultad de Ingeniería Univ. Surcolombiana.

Se calculó el error absoluto de la infiltración acumulada en cada uno de los intervalos de tiempo, obtenida a través del procedimiento manual de la prueba de anillos infiltrómetros, respecto a los valores de infiltración acumulada brindados por el prototipo automatizado. En las tabla 3, 4 y 5 se muestran los valores de infiltración acumulada con los errores obtenidos para cada predio. Se determinó como error de cada prueba el mayor error absoluto obtenido y finalmente se tomó como error máximo del prototipo automatizado el mayor error de las tres pruebas realizadas. En las figuras 6, 7 y 8 se muestran las gráficas de infiltración acumulada y valores de infiltración obtenidos utilizando el prototipo automatizado.

Tabla 3. Resultados obtenidos en el predio 1.

Tiempo (min)	Infiltración Acumulada (cm) Prueba manual	Infiltración Acumulada (cm) Prueba automatizada	Error absoluto (%)
1	0.10	0.09	11.11
2	0.10	0.09	11.11
3	0.20	0.18	11.11
4	0.20	0.18	11.11
5	0.20	0.18	11.11
10	0.20	0.19	5.26
15	0.20	0.20	0

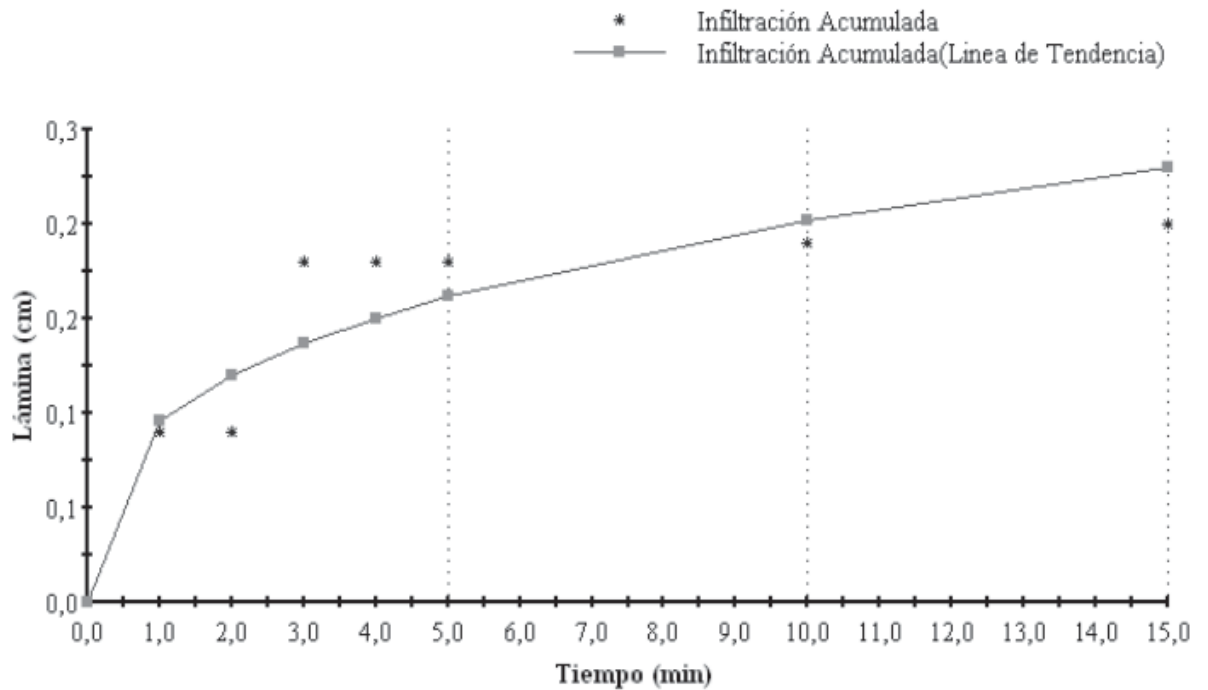


Figura 6. Gráfica de capacidad de infiltración en el predio 1.

La infiltración de la lámina de agua en el suelo del predio 1 fue lenta, ya que ésta se encontró en el rango de 0.0016 - 0.0083 cm/min. Por tal razón la prueba se finalizó transcurridos 15 minutos.

Tabla 4. Resultados obtenidos en el predio 2.

Tiempo (min)	Infiltración Acumulada (cm) Prueba manual	Infiltración Acumulada (cm) Prueba automatizada	Error absoluto (%)
1	0.20	0.18	11.11
2	0.20	0.19	5.26
3	0.30	0.28	7.14
4	0.40	0.36	11.11
5	0.50	0.38	4.16
10	0.80	0.74	8.10
15	1.10	1.00	10.00
30	2.00	1.80	11.11
45	2.70	2.57	5.05
60	3.50	3.32	5.42
90	5.80	5.40	7.40
120	6.90	6.50	6.15

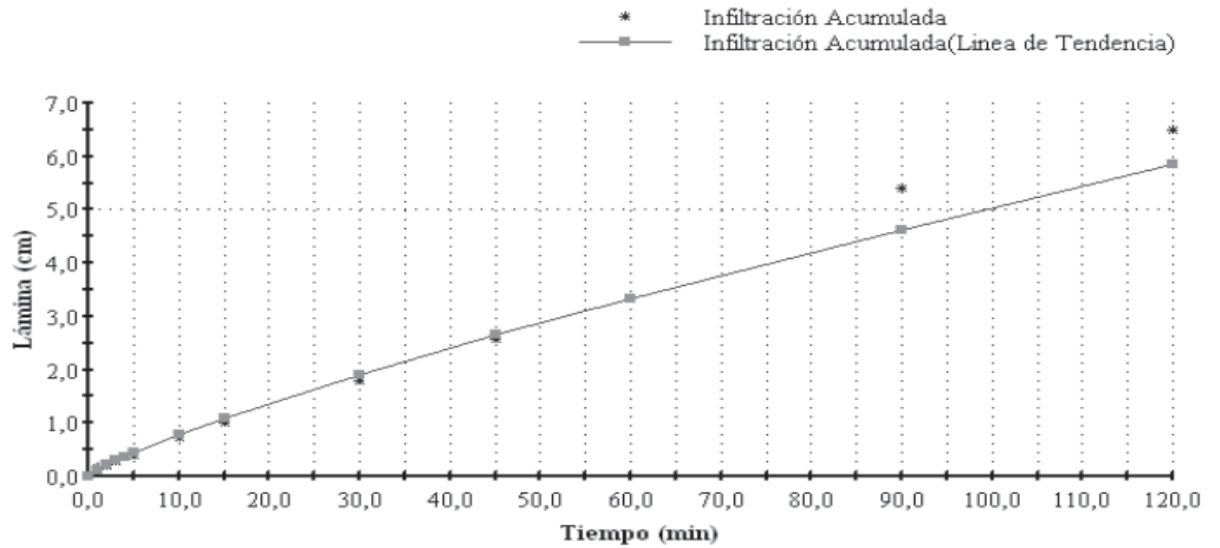


Figura 7. Gráfica de capacidad de infiltración en el predio 2.

El suelo del predio 2 tiene capacidad de infiltración moderada, ya que ésta se encontró en el rango de 0.0333 - 0.1050 cm/min.

Tabla 5. Resultados obtenidos en el predio 3.

Tiempo (min)	Infiltración Acumulada (cm) Prueba manual	Infiltración Acumulada (cm) Prueba automatizada	Error absoluto (%)
1	0.50	0.45	11.11
2	0.90	1.00	-0.10
3	1.10	1.06	3.77
4	1.50	1.38	11.11
5	1.80	1.66	8.43
10	2.20	2.92	-24.65
15	3.30	4.11	-19.70
30	7.70	7.36	4.62
45	10.90	10.40	4.80
60	13.70	13.13	4.34
90	19.60	18.17	7.87
120	24.60	23.08	6.58

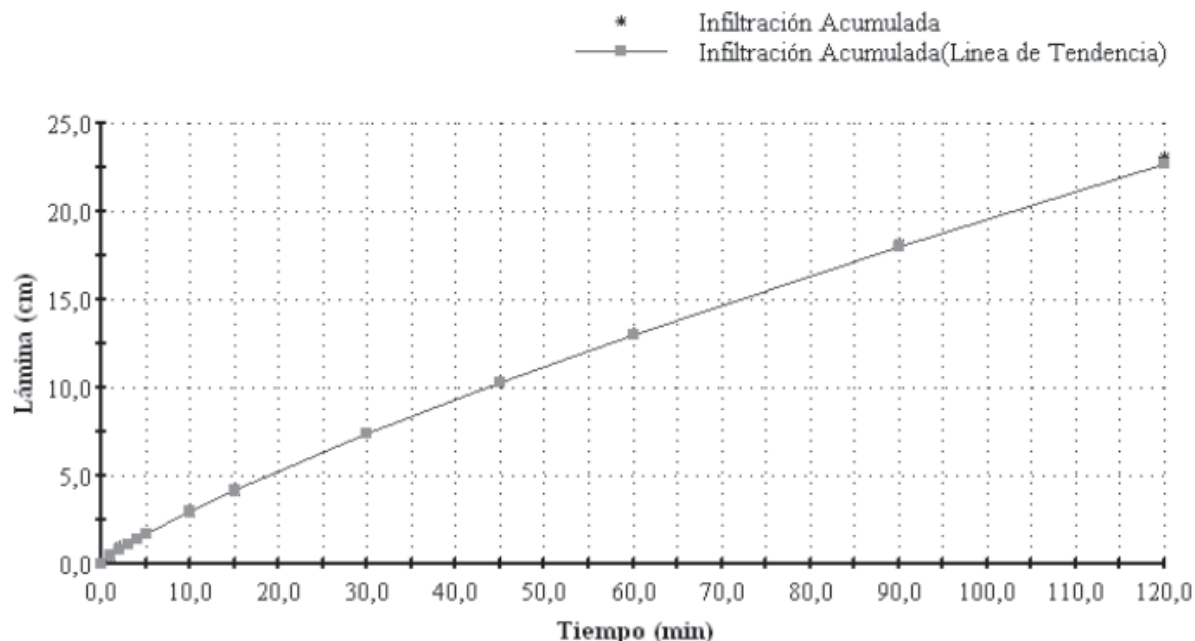


Figura 8. Gráfica de capacidad de infiltración en el predio 3.

El suelo del predio 3 tiene capacidad de infiltración rápida, ya que ésta se encontró en el rango de 0.2116 - 0.4233 cm/min.

4. Conclusiones

Se desarrolló un prototipo de automatización de la prueba de infiltración de anillos que hace innecesaria la presencia continua de un operador, lo que además de un ahorro de personal trae consigo la disminución del error en las lecturas del nivel de la lámina de agua del cilindro. El error máximo del prototipo fue del 11.11% el cual es aceptable, puesto que el sensor posee un error de precisión propio de los instrumentos de medida digitales y de igual forma existe error humano al registrar las medidas en el procedimiento manual que se realizó para hacer la comparación.

El prototipo es totalmente portátil ya que los equipos que la conforman son muy livianos, además de que su alimentación se hace por medio de baterías recargables, condiciones determinantes tratándose de una prueba que se realiza en campo abierto donde se carece de fuentes de alimentación.

Para realizar el control de prueba de infiltración de suelos se diseñó una tarjeta de control electrónica en la cual se integran las entradas, salidas e interfaz de comunicación. Se diseñó solo una tarjeta con el objeto de hacerla más compacta y menos compleja.

Se desarrolló un software a partir del programa Visual Basic 6.0 al cual se nombró InfilSuelos V. 1.0. Se caracteriza por la facilidad en la transmisión de los datos desde el prototipo al computador permitiendo escoger solo los puertos seriales disponibles de éste, evitando así un error en la comunicación. Además se obtiene la gráfica de infiltración acumulada del suelo, la cual se puede observar detalladamente gracias a la opción de zoom. Por otra parte existe la posibilidad de guardar los datos de cada prueba en un archivo de texto en el computador para un posterior análisis. Finalmente, realiza una interpretación de la prueba y permite la impresión de los resultados del estudio.

5. Referencias Bibliográficas

1. Amézketa Lizárraga, E., Gazol Lostao, R., Aragüés Lafarga, R., 2002. Desarrollo de un Infiltrómetro Automático y su Aplicación en Campo. Investigación Agraria. Producción y Protección vegetales, vol. 7. 131-142.
2. Angulo Jaramillo, R., Vandervaere, J.P., Roulier, S., Thony, J.L., Gaudet, J.P., Vauclin, M., 2000. Field measurements of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrimeters. A review and recent developments. Soil & Till. Res. 55, 1-29.
3. Castro, C.M., 2009. Diseño de Sistemas de Riego: Fundamentos: Apuntes de Riegos I. Versión 112.Knol. Consultado el 28 de Abril de 2010. <http://knol.google.com/k/carlos-mario-castro-navarro/diseño-de-sistemas-de-riego-fundamentos/1i29ptfum49sf/5>.
4. Gurovich, L.A., 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. IICA. 433p.
5. Reynolds, W. D., Elrick, D.E., 1990. Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 1233-1241.
6. Santa Olalla M añas, F.M., Calera Belmonte, A., López Fuster, M., 2005. Agua y Agronomía. Madrid, España: Mundi-Prensa Libros. 606 pp.
7. Torrente Trujillo, A., Salinas Tejada, F., Perea Rivas, J., 1998. Capacidad de Infiltración del Suelo "Método de los Anillos Infiltrómetros". Guía Práctica de Parámetros de Riego Universidad Surcolombiana. 185pp.
8. Wang, D., Yates, S.R., Lowery, B., Van Genuchten, M. Th., 1998. Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrimeters with varying disk diameters. Soil Sci. 163, 356-361.