

# Basculador cilíndrico para medidas volumétricas de escorrentía superficial

## Cylindrical jogger for surface measures volumetric runoff

Ignacio Llanos Triviño

*IFAPA, Centro Alameda del Obispo. Área de Producción Ecológica y Recursos Naturales. Apdo. 3082. 14080 Córdoba, España.  
E-mail: ignacio.llanos@juntadeandalucia.es*

Recibido/Received: 2014.02.05  
Aceitação/Accepted: 2014.06.24

### RESUMEN

La escorrentía superficial provoca la erosión y pérdida de suelo fértil. Los trabajos dirigidos a su prevención y corrección son de gran interés tanto desde el punto de vista agrícola como medioambiental. Para su estudio se utilizan equipos medidores de caudal o aforadores, siendo los de tipo basculante los de uso más generalizado por su simple diseño y comportamiento fiable. Sin embargo, en situaciones concretas como presencia de viento fuerte o altas cadencias de basculación su comportamiento es impreciso. Además, por su diseño, la instalación en campo suele presentar dificultades. En este trabajo se describe un aforador que elimina estas limitaciones mediante la sustitución del sistema basculante por uno de tipo giratorio. Está formado por un cilindro horizontal dividido axialmente en dos semicilindros que se sitúan alternativamente mediante semigiros en posición receptora de la escorrentía. La basculación se produce cuando la escorrentía recogida alternativamente en cada uno de los semicilindros alcanza un volumen determinado. Este volumen se controla mediante un sensor de nivel y el giro se produce por medio de un motorreductor. El equipo trabaja a 12V con un bajo consumo y su diseño es escalable mediante la simple sustitución del cilindro receptor.

**Palabras Clave:** escorrentía, medidor caudal, medio ambiente, agricultura de regadío

### ABSTRACT

The assessment of soil on slopes drag due to rain or irrigation is a fundamental activity in agricultural and environmental studies. For their study teams often use tilting cups. Its design is simple, reliable operation. However, they have some limitations such as loss of accuracy in situations of high runoff or wind and the difficulty of field installation. To cancel these drawbacks, in this work, the cups were replaced by a rotary horizontal cylinder axially divided into two half cylinders. The moment for the rotation is determined alternatively with a level control and it is activated by a gear motor. The equipment works under 12VDC with low energy consumption. The design is scalable by simply replacing the receiving cylinder.

**Keywords:** agricultural irrigation, environment, flow meter, runoff

### Introducción

La escorrentía superficial es un proceso que se produce cuando el suelo, en situaciones de pendiente, es incapaz de infiltrar el agua de lluvia o riego y esta corre sobre la superficie arrastrando material sólido y causando lo que se denomina erosión. La erosión es causante de la pérdida de suelo fértil y del lavado de fertilizantes y productos agroquímicos, colmata cuencas y produce cárcavas que causan daños a veces irreversibles.

Para su control es necesario hacer estudios de valoración con el fin de poder actuar las medidas más

apropiadas en función de los resultados obtenidos. Estos trabajos se pueden hacer sobre parcelas experimentales o directamente en las zonas de evacuación natural. Los objetivos pueden ser de tipo cuantitativo o cualitativo. Los primeros se limitan a medir la escorrentía; los segundos, además, toman muestras para conocer y valorar los componentes arrastrados.

Los aforadores de tipo basculante son los equipos más utilizados para estos trabajos por su robustez y simplicidad de diseño. Un ejemplo de ellos es el desarrollado por Khan y Ong (1997), y funcionan mediante el llenado alternativo de dos envases o

cangilones solidarios a un eje de giro. Cuando en uno de ellos se almacena un volumen determinado de escorrentía se produce la basculación y su consiguiente vaciado, quedando el envase opuesto en posición de recarga. Mediante un sistema generador de pulsos se registra el número de basculaciones y, por deducción, el volumen total de escorrentía. Si los pulsos se recogen en tiempo real, se puede determinar la variación del flujo a lo largo de tiempo de control. La Figura 1 muestra un aforador de este tipo instalado en campo (Prieto, 2003).



**Figura 1** – Equipo basculador de cangilones montado en campo.

Debajo del extremo de cada cazoleta se coloca un tope ajustable en altura para fijar el ángulo de vuelco que es el que determina el volumen necesario para producir la basculación. En la Figura 1, se puede ver en uno de los laterales de volcado un colector de muestras formado por un cilindro cerrado con una serie de perforaciones en la parte superior. De la parte inferior se deriva un conducto para la recogida de muestras. El volumen desviado para el muestreo se controla con el número y diámetro de las perforaciones (Khan y Ong, 1997).

Los aforadores basculantes de este tipo presentan algunos inconvenientes: (i) su diseño voluminoso obliga a realizar una excavación en el terreno para su instalación (Fig. 1); (ii) situaciones de viento fuerte afecta a la precisión de los controles al desviar el flujo con pérdidas de caudal y alteración de la recarga de los cangilones; (iii) si la velocidad de basculación es baja, el caudal de escorrentía es pequeño y el volumen de agua por vuelco es bastante estable, no siendo así para situaciones de vuelco rápidos (Barfield y Hirschi, 1986). A pesar de ello, en un episodio de control suficientemente largo, el error cometido en la medida no es importante (Khan y Ong, 1997; Zhao *et al.*, 2001); (iv) con altas velocidades de vuelco, el equipo se vuel-

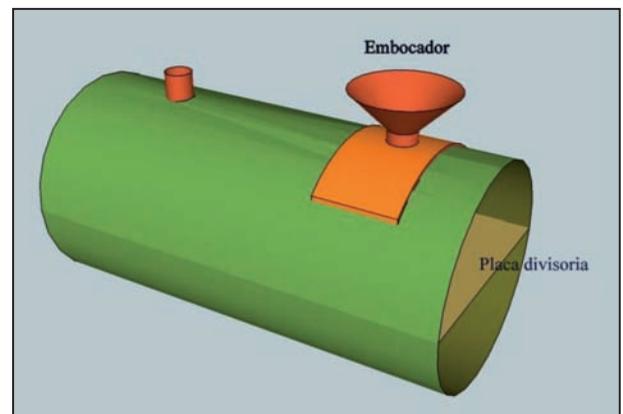
ve inestable por producirse rebotes sobre los toques de ajuste. Estos rebotes se pueden reducir parcialmente con amortiguadores de absorción (Laguna, 1989).

## Material y Metodos

### Descripción

El aforador que describe este trabajo elimina las limitaciones anteriores mediante la sustitución de los cangilones por un cilindro horizontal, dividido axialmente en dos compartimentos semicilíndricos mediante una placa metálica. Su diseño es compacto y muy manejable al eliminar la bandeja colectora y el componente basculador. El principio de su funcionamiento es análogo a los de tipo basculante: los semicilindros se llenan alternativamente con la escorrentía produciéndose un giro de 180° cada vez que se alcanza en cada uno de ellos un volumen determinado. La escorrentía se vierte en el cilindro a través de un embocador. Cada semicilindro tiene dos orificios, uno de carga-descarga y otro por el que se desvía una fracción de la descarga para la posible recogida de muestras, bien de forma manual o automatizada (Llanos, 2008).

La Fig. 2 muestra sus componentes fundamentales: el cilindro, la placa divisoria y el embocador.

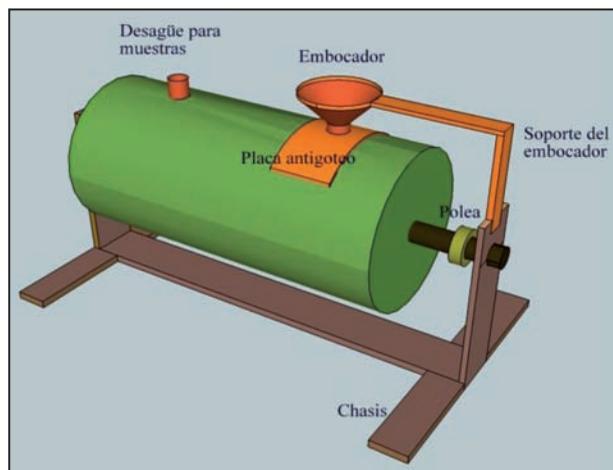


**Figura 2** – Cilindro abierto con embocador y placa divisoria.

El cilindro se cierra por ambos lados con dos discos en los que se fijan los dos semiejes de giro. Un chasis soporta el conjunto embocador-cilindro y los elementos necesarios de control.

El embocador está formado por un cuerpo colector al que se conecta el conducto procedente de la zona de control y una placa antigoteo. La misión del embocador es, además de conducir la escorrentía hacia en

aforador, servir de envase transitorio de ésta durante la duración del semigiros del cilindro. Está fijado al chasis por medio de un soporte que permite el ajuste de la presión de contacto entre placa y cilindro con el fin de minimizar el rozamiento entre estos sin que se produzcan pérdidas de escorrentía (Fig. 3).

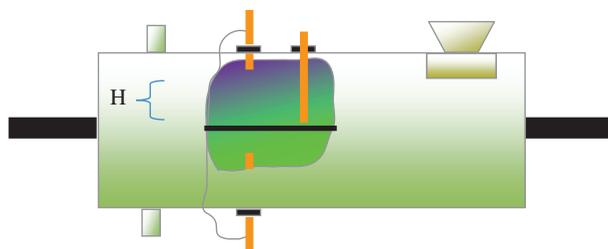


**Figura 3** – Cilindro cerrado y componentes.

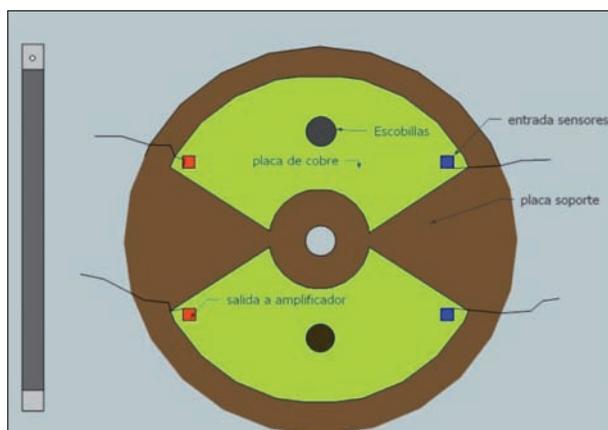
#### Componentes de activación y control

El mecanismo de giro está formado por el eje del cilindro y una polea dentada unida al eje de un motorreductor por medio de una correa de transmisión. La activación del motorreductor se produce cuando la escorrentía recogida en cada semicilindro alcanza un volumen determinado. Este volumen se fija por medio de una sonda de nivel con dos electrodos de ajuste (uno por semicilindro) y un electrodo común de masa unido a la placa divisoria. Los electrodos son varillas de acero inoxidable de 6 mm de diámetro aisladas en toda su longitud, dejando libres sus extremos para el control del nivel y la conexión de los cables de transmisión de señal. La fijación a los semicilindros permite su deslizamiento con el fin de poder ajustar el volumen de giro. Este ajuste se realiza variando la distancia entre el electrodo de nivel de cada semicilindro y la placa divisoria (Figura 4). En la Figura 4, H indica el ajuste de nivel. Variaciones de H implica variaciones del volumen necesario de escorrentía recogida para realizar el giro del cilindro.

Dos escobillas conectan la señal de los dos electrodos de nivel y masa con dos placas de cobre situadas en un disco soporte (Figura 5). Mediante este componente se permite el giro unidireccional simplificando el diseño del equipo.



**Figura 4** – Control del volumen de vuelco por nivel.



**Figura 5** – Electrodo (izqda) y detalle del disco de distribución (dcha): verde, placas de cobre; marrón, disco soporte; azul, entrada de sensores; rojo, salidas al amplificador; negro, escobillas.

#### Funcionamiento

El cilindro realiza giros de 180° posicionando siempre al final de cada uno un semicilindro en la parte superior. El giro se inicia cuando el nivel de la escorrentía recogida en el semicilindro receptor contacta con el electrodo de nivel. La señal se transmite a un amplificador a través de las escobillas en contacto con las placas de cobre del disco de distribución (Fig. 6). Un relé auxiliar envía esta señal a la entrada correspondiente del controlador del sistema. El control del giro y por lo tanto, el posicionamiento del cilindro, se realiza mediante un doble detector de posición formado por un interruptor de proximidad fijo al chasis y dos imanes solidarios al cilindro colocados entre sí a 180°. El funcionamiento secuencial consiste en el control de dos señales de entrada (nivel y posicionamiento) y una señal de salida (activación del motorreductor). Su lógica operativa se recoge en la Tabla 1.

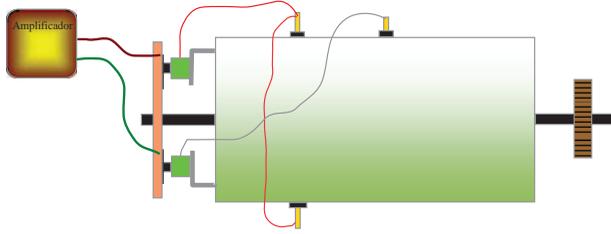


Figura 6 – Conexionado entre sensores de nivel y amplificador.

Tabla 1 – Secuencia operativa.

Interruptor de posicionamiento (I1)*	Electrodo de nivel (I2)*	Disco de distribución**	Salida al motorreductor (Q1)
1	0	1	0
1	1	1	1
0	0	indiferente	1
1	0	1	0

\* I1 e I2 son las entradas del programador

\*\* Situación 1 cuando las escobillas se posicionan sobre las dos placas de cobre

Esta lógica se hace operativa en el programador mediante la ecuación (1):

$$\begin{aligned}
 I1 \text{ AND } I2 &\text{ ----> SET Q1} \\
 I2 &\text{ ---->(DIFU 0.1s) ----> RESET Q1}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

siendo I1, la entrada de señal del amplificador del sensor de nivel; I2, la entrada del sensor de posición; Q1, la salida de activación del motorreductor. La función DIFU produce un disparo de salida de 0.1 s cuando la entrada I2 está activa. Entre la salida Q1 y el motorreductor se puede colocar un regulador de voltaje para ajustar la velocidad de giro del cilindro. La Fig. 7 muestra el conjunto de elementos y su conexionado.

## Resultados y Discusión

Las Figuras 8 a 11, muestran detalles del equipo con sus componentes. Los ensayos se han realizado utilizando un cilindro de PVC de 90 mm de diámetro y 250 mm de longitud con un volumen máximo útil de almacenamiento por semicilindro de 800 mL y han tenido por objeto determinar la fiabilidad y estabilidad del funcionamiento de cada uno de los componentes y los resultados globales de comportamiento del medidor. Se han comparado los volúmenes necesarios para el volcado de forma estática y dinámica. Una vez fijados los electrodos de nivel, se midieron los volúmenes necesarios de agua para activar el giro de cada semicilindro mediante carga directa con probeta (control estático). Para los ensayos dinámicos se aportó agua de forma continua utilizando un circuito hidráulico cerrado formado por un depósito, una minibomba, un conducto de descarga y una llave de paso para el ajuste del caudal de los ensayos. Las Figuras 12 y 13 muestran el diseño del equipo de ensayo y una vista general del mismo.

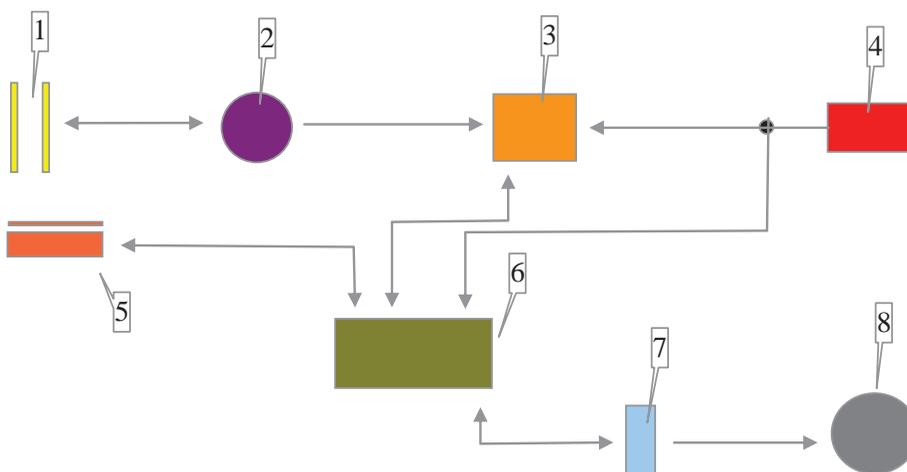


Figura 7 – Diagrama operativo. 1: sensor de nivel; 2: disco distribuidor; 3: amplificador de señal; 4: batería; 5: posicionador; 6.- programador; 7: regulador; 8: motorreductor.



**Figura 8** – Vista general.



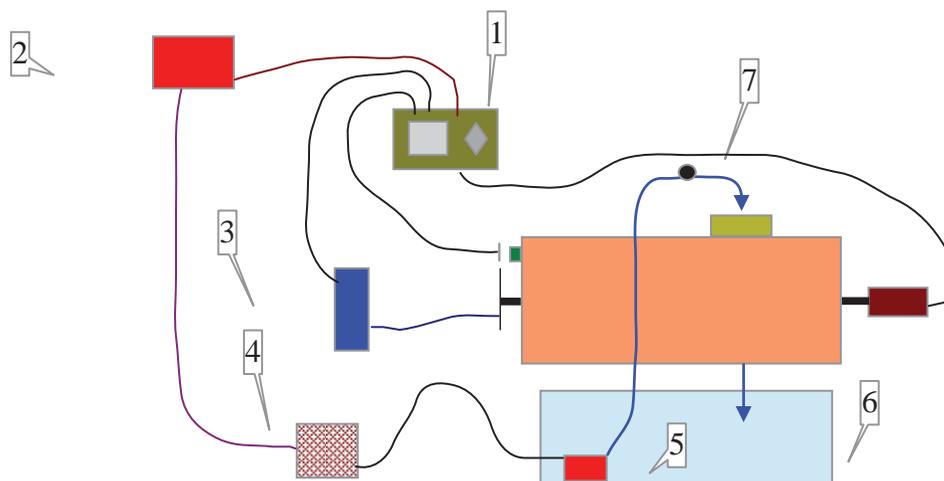
**Figura 9** – Disco distribuidor.



**Figura 10** – Mecanismo motor.



**Figura 11** – Colector con placa antigoteo.



**Figura 12** – Componentes del equipo de prueba. 1: programador; 2: alimentación; 3: amplificador; 4: regulador; 5: minibomba; 6: depósito; 7: llave de paso.



**Figura 13** – Vista general de montaje para los ensayos.

Para el ensayo dinámico, se han utilizado siete caudales diferentes comprendidos entre 11,58 y 35,3 mL/s. Los volúmenes de basculación se han determinado multiplicando el caudal utilizado en cada ensayo por el tiempo transcurrido entre el inicio de dos semigiros consecutivos. Los electrodos de nivel se han mantenido en todos los ensayos en la misma posición.

Los resultados se muestran en la Tabla 2. Los volúmenes de referencia medidos en los semicilindros fueron de 325 y 320 mL. La diferencia de volúmenes se debe al distinto ajuste de los electrodos de nivel en cada semicilindro. Los volúmenes de volcado en los ensayos dinámicos han sido de 339 mL y 312,3 mL con una diferencia con el calibrado estático para el cilindro completo de 26,30 mL (4,20%).

Las diferencias se deben al caudal no controlado durante el tiempo que transcurre entre el inicio de cada semigiro y el momento en el que el orificio de recarga del semicilindro deja de estar enfrentado con el del embocador (0,37 s para una velocidad de giro de 16,8 rpm y un diámetro de la boca de recarga de 30 mm). Si se considera este tiempo como neutro (a restar de los tiempos controlados), la diferencia entre volúmenes se reduce a 9 mL (1,16%).

El calibrado muestra una relación ( $R^2 = 0,997$  para un giro completo) entre los tiempos de carga para el volcado y los caudales de ensayo según  $T = 669,92 \cdot Q^{-1,008}$ . El volumen de escorrentía de un episodio de control se calcula mediante la ec. (2),

$$V_E = (V_{c1} + V_{c2}) \cdot K \cdot N / 2 \quad (2)$$

siendo  $V_E$  el volumen total de escorrentía;  $V_{c1}$  y  $V_{c2}$  los volúmenes de basculación de cada semicilindro que depende del ajuste de los electrodos de nivel;  $K$  (1,04 para el prototipo), es la relación entre los volúmenes de vuelco dinámicos y el estáticos, que depende de la velocidad de giro y de la relación entre los diámetros del cilindro y del orificio del embocador;  $N$ , es el número de vuelcos.

## Conclusiones

El equipo ha funcionado correctamente en todos sus componentes y aspectos del diseño. Se ha detectado pequeñas fugas entre la placa antigoteo y el

**Tabla 2** – Resultados de los ensayos.

Ensayos	Caudal del ensayo (mL/s)	Tiempos de carga (s)			Volumen de basculación (mL)		
		Semi-cilindro 1	Semi-cilindro 2	Cilindro completo	Semi-cilindro 1	Semi-cilindro 2	Cilindro completo
<b>1</b>	<b>11,58</b>	29,77	27,77	57,34	342,42	321,58	664,00
<b>2</b>	<b>15,44</b>	21,45	19,52	40,97	331,22	301,45	632,67
<b>3</b>	<b>18,52</b>	18,17	16,70	34,87	336,51	309,28	645,79
<b>4</b>	<b>21,50</b>	15,49	14,50	29,99	333,04	311,75	644,79
<b>5</b>	<b>27,93</b>	12,31	11,26	23,57	343,82	314,49	658,31
<b>6</b>	<b>33,00</b>	10,18	9,41	19,59	335,94	310,53	646,47
<b>7</b>	<b>35,31</b>	9,91	8,98	18,89	349,96	317,08	667,04
Volumen medio dinámico de basculación					<b>338,99</b>	<b>312,31</b>	<b>651,30</b>
Volumen estático de basculación					<b>325,00</b>	<b>300,00</b>	<b>625,00</b>
Diferencias entre volúmenes dinámicos y estáticos de basculación (%)					<b>4,30</b>	<b>4,10</b>	<b>4,20</b>

cilindro en el momento del giro. Los controles efectuados han proporcionado datos fiables con errores despreciables. Para el trabajo se han utilizado componentes modulares con el fin de facilitar los ajustes y el control de los ensayos. Estos componentes pueden integrarse fácilmente en una tarjeta electrónica de control. El equipo es escalable mediante la utilización de cilindros de distintas dimensiones para su utilización en un amplio rango de aplicaciones.

## Agradecimientos

Al personal de campo y laboratorio del equipo de física y química de suelos del Centro IFAPA Alameda del Obispo por su colaboración en los ensayos y al proyecto RTA 2010-00026-C02-01 financiado por INIA en el marco del "Subprograma Nacional de Recursos y Tecnologías Agrarias en Cooperación con las Comunidades Autónomas" enmarcado en el Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+I) y cofinanciado por la Unión Europea a través de los Fondos FEDER.

## Referencias bibliográficas

- Barfield B.J. y Hirschi, M.C. (1986) - Tipping bucket flow measurements on erosion plots. *Trans. ASAE*, vol. 29, n. 6, p. 1600-1604.
- Khan, A.H.Y.C. y Ong, C.K. (1997) - Design and calibration of tipping bucket system for field runoff and sediment quantification. *J. Soil Water Conserv.*, vol. 52, n. 6, p. 437-439.
- Laguna, A. (1989) - Análisis cuantitativo de la erosión del suelo. Tesis doctoral. Dpto. Agronomía. Universidad de Córdoba. España
- Llanos, I. (2008) - Un equipo para medidas de desagüe y muestreo de escorrentía en parcelas experimentales. *Revista Ingeniería del Agua*, vol. 15, n. 3, p. 137-146.
- Prieto, C. (2003) - *Diseño, construcción e instalación de un aforador de caudal para parcelas experimentales de lluvia, escorrentía y erosión*. Trabajo profesional fin de carrera. Córdoba, España, ETSIAM.
- Zhao, S.L.; Dorsey, E.C.; Gupta, S.C.; Moncrief, J.F. y Huggins, D.R. (2001) - Automated water sampling and flow measuring devices for runoff and subsurface drainage. *J. Soil Water Conserv.*, vol. 56, n. 4, p. 299-306.