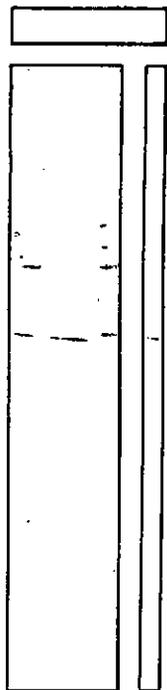




Universidad de la República  
FACULTAD DE AGRONOMIA



**MEDICION DE AGUA DE RIEGO:  
EVALUACION DE DOS  
AFORADORES DE PRECISION  
Y MINIMA PERDIDA DE CARGA**

PABLO J. DURAN - MARIO GARCIA

**BOLETIN DE INVESTIGACION N° 32**

**MONTEVIDEO**

1991

**URUGUAY**

El "Boletín de Investigación" es una publicación seriada que recoge los resultados de las investigaciones realizadas por el personal académico de la Facultad de Agronomía, una vez que ellos fueron revisados y aprobada su publicación por la Comisión de Publicaciones Científicas. Las solicitudes de adquisición y de intercambio con este Boletín debe dirigirse al Departamento de Documentación, Facultad de Agronomía, Garzón 780, Montevideo - URUGUAY.

Comisión de Publicaciones Científicas:

Martín Buxedas, Primavera Azaguirre, Carlos Bentancourt (docentes),  
Pablo Fernández (estudiante),  
Roberto Malfatti (profesional),  
Alicia Torres (comunicadora rural),  
Gustavo Uriarte (editor técnico).

Medición de agua de riego: evaluación de dos aforadores de precisión y mínima pérdida de cargas. / Pablo J. Durán, Mario García. -- Montevideo: Facultad de Agronomía, 1991. -- 16 p. -- (Boletín de investigación; 32)

AFORADORES  
MEDICION DEL AGUA  
RIEGO

CDU 631.67

## MEDICION DE AGUA DE RIEGO: EVALUACION DE DOS AFORADORES DE PRECISION Y MINIMA PERDIDA DE CARGAS.

Pablo J. Durán \*  
Mario García \*\*

### RESUMEN

La medición del agua de riego es un elemento básico para lograr un manejo eficiente de la misma.

Existen múltiples dispositivos clásicos de aforo en conducciones a cielo abierto, los cuales en su totalidad provocan pérdida de carga, verificándose distintos niveles de precisión en la medición.

En muchas situaciones de riego no se dispone de la carga necesaria para la utilización de estos aparatos.

Se presenta en este trabajo el comportamiento y la evaluación de dos aforadores diseñados para trabajar con mínima pérdida de carga y alta precisión.

Uno de los mismos (aforador de pantalla), puede ser utilizado con cargas menores a 5 cm, siendo este valor considerablemente reducido.

Ambos demostraron una precisión en la medición muy superior a todos los dispositivos clásicos.

*Palabras claves:* Riego, Aforadores, Medición del agua.

### SUMMARY

Irrigation water measurement is an important tool for an efficient water use management.

Although lots of measuring devices have been developed for measuring channel carrying capacity, all of them need a considerable water head, and the measurements practiced in the channels are unprecises.

This publication evaluates two measuring devices performance, designed to work with minimum water head losses and high precision.

One of them (the plate-device), can be used with less than 5 cm of water head, and both have shown higher precision degrees than de classic devices.

*Key words:* Irrigation, Gauges, Water measurement.

---

Recibido el 3 de julio de 1990

Aceptado el 30 de octubre de 1990

\* Ing. Agr. Asistente de Hidrología

\*\* Ing. Agr. Ayudante de Hidrología

## 1. INTRODUCCION

El control del agua de riego viene incrementando su importancia en virtud de los altos costos de bombeo que hacen necesario mejorar la eficiencia en el uso del recurso, mediante técnicas de control de la derivación y distribución de agua.

Esto es especialmente importante en los sistemas de riego multiprediales en los cuales existe un uso en común de la infraestructura de bombeo y conducción.

Hasta el momento, la forma más usual de cobro de los costos de riego viene referida a la superficie regada por cada uno de los usuarios del sistema. Esta mecánica, adoptada por su sencillez en el cálculo del prorrateo, tiene como contrapartida negativa que, lejos de estimular a los productores a hacer un uso más eficiente del agua, se tienda a descuidar las pérdidas por escurrimiento o por infiltración profunda.

Las administraciones de los sistemas ven claramente la necesidad de pasar de un cobro por hectárea regada a un cobro por volumen entregado en la chacra. Tal es el caso de la Colonia "España" del Instituto Nacional de Colonización (I.N.C.), y en general de todos los sistemas que atienden cultivos de caña de azúcar y arroz.

La dificultad para realizar el cambio en la política de prorrateo de costos de riego, radica en la falta de implementación de tecnología de aforo que pueda operar en todas las situaciones reales planteadas.

Analizada la situación del Distrito de Riego de la Colonia "España", encontramos que un porcentaje importante de compuertas no pueden ser aforadas por medio de dispositivos que utilizan la pérdida de carga para estimar el caudal. Esto se debe a que dichas compuertas trabajan con cargas reducidas. Vale decir que la diferencia de nivel entre el pelo de agua del canal y el pelo de agua en la reguera no es suficiente como para permitir la instalación de vertedores ni aforadores de flujo crítico.

Los medidores totalizadores, que técnicamente se adaptarían a estas situaciones, tienen un costo mayor, y no pueden ser fabricados localmente.

El objetivo de este trabajo es describir y realizar un análisis comparativo de dos aforadores diseñados y evaluados en relación con otros dispositivos clásicos, utilizados para la medición de agua en conducciones a cielo abierto en la situación descrita.

Se buscó al diseñar los aforadores cumplir con las siguientes condiciones:

- 1) Trabajar con la mínima pérdida de carga posible.
- 2) Lograr precisión en la medida y una buena sensibilidad en todo el rango de operación.
- 3) Ser factible su construcción con los recursos técnicos existentes en el país, sin requerir una industria especializada para ello.
- 4) Bajo costo.

## 2. DESCRIPCION

A continuación se presentan los principales detalles constructivos de ambos aforadores. Por no tratarse de dispositivos estándar, los datos de comportamiento son particulares de los mismos. Otros aparatos de construcción similar deberán ser previamente calibrados.

### 2.1. Aforador de pantalla

Como se ve en la figura Nro. 1, el aparato consiste en un conducto de sección cuadrada por el cual se hace circular el agua. En dicho conducto hay una pantalla que pivotea sobre un eje al cual está unida por su parte superior. El grado de desplazamiento de la pantalla se registra en un dial graduado mediante una aguja solidaria con el eje. Esta lectura está correlacionada con el caudal circulante.

Un dispositivo basado en principios similares, llamado "aforador de flexión", es citado por KRAATZ y MAHAJAN, 1976.

A fin de uniformizar las condiciones de trabajo, se diseñó el aparato de forma tal que la sección de medición trabajara totalmente inundada.

El aparato fue construido en madera, aunque pueden ser utilizados otros materiales (chapa, fibra de vidrio, etc.).

Las medidas están detalladas en la figura Nro. 2.

La placa consiste en un rectángulo de chapa a la cual se le pueden adicionar distintas pesas en su extremo inferior para trabajar con distintos rangos de caudal.

La utilizada para los datos que se presentan tiene las medidas detalladas en la figura Nro. 3, siendo construida en chapa de hierro 16, con un peso de 202 g y 4 pesas del mismo material y de 16 g cada una.

El eje está montado sobre casquillos de bronce, estando su diseño y medidas detallados en la misma figura.

La aguja se sujeta al eje por medio de un tornillo, de forma de poder ajustar el 0 de la escala.

El aforador tiene una entrada convergente y una salida divergente para facilitar el encauzamiento del flujo, y aletas en la entrada que se entierran en el fondo y paredes de la reguera para asegurar que todo el caudal circule por el conducto de medición.

### 2.2. Aforador de orificio variable

Según se observa en la figura Nro. 4, consiste en una caja a la cual se hace entrar el flujo conducido por la reguera, saliendo éste por un orificio lateral de apertura

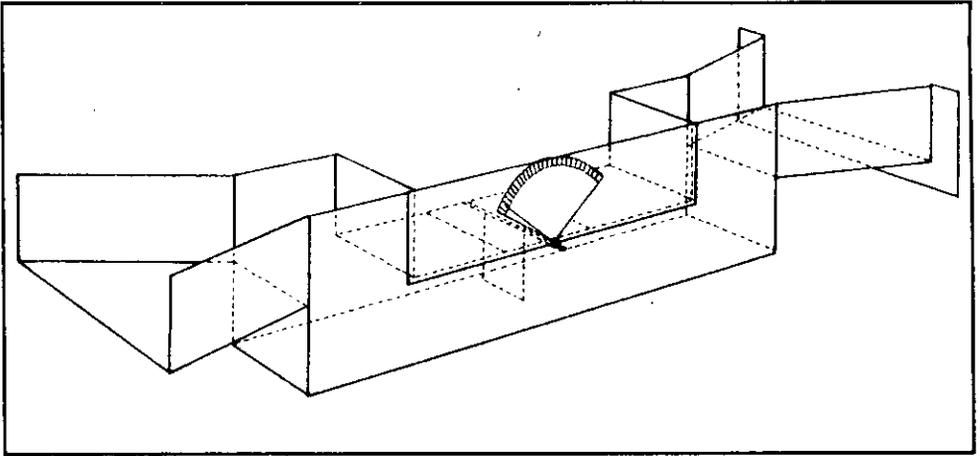


FIGURA 1: Vista en perspectiva del aforador de pantalla.

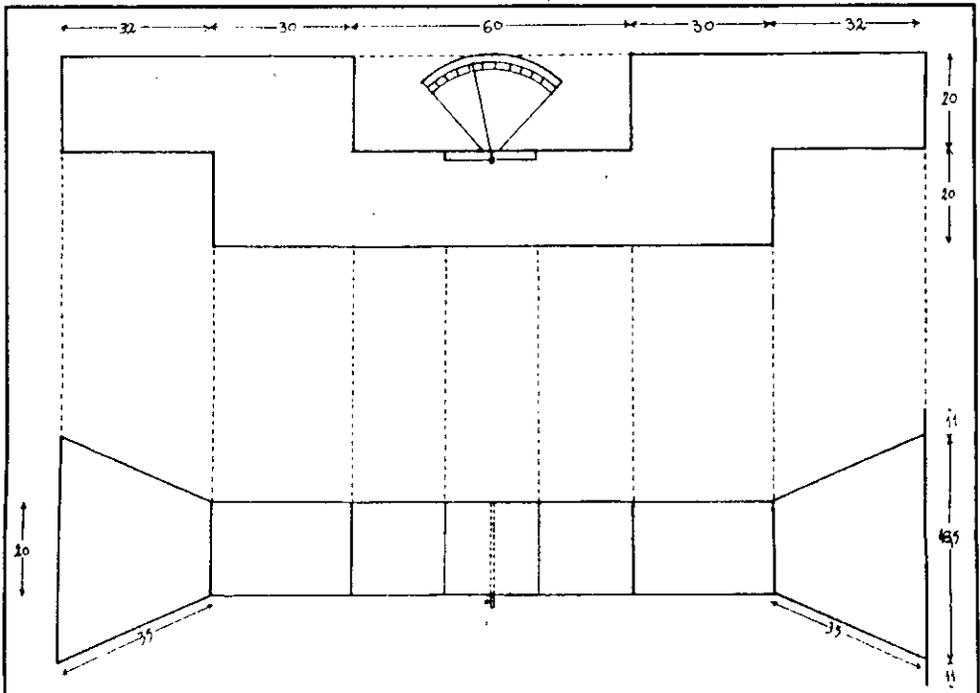


FIGURA 2: Frente y planta del aforador de pantalla (mediadas en cm).

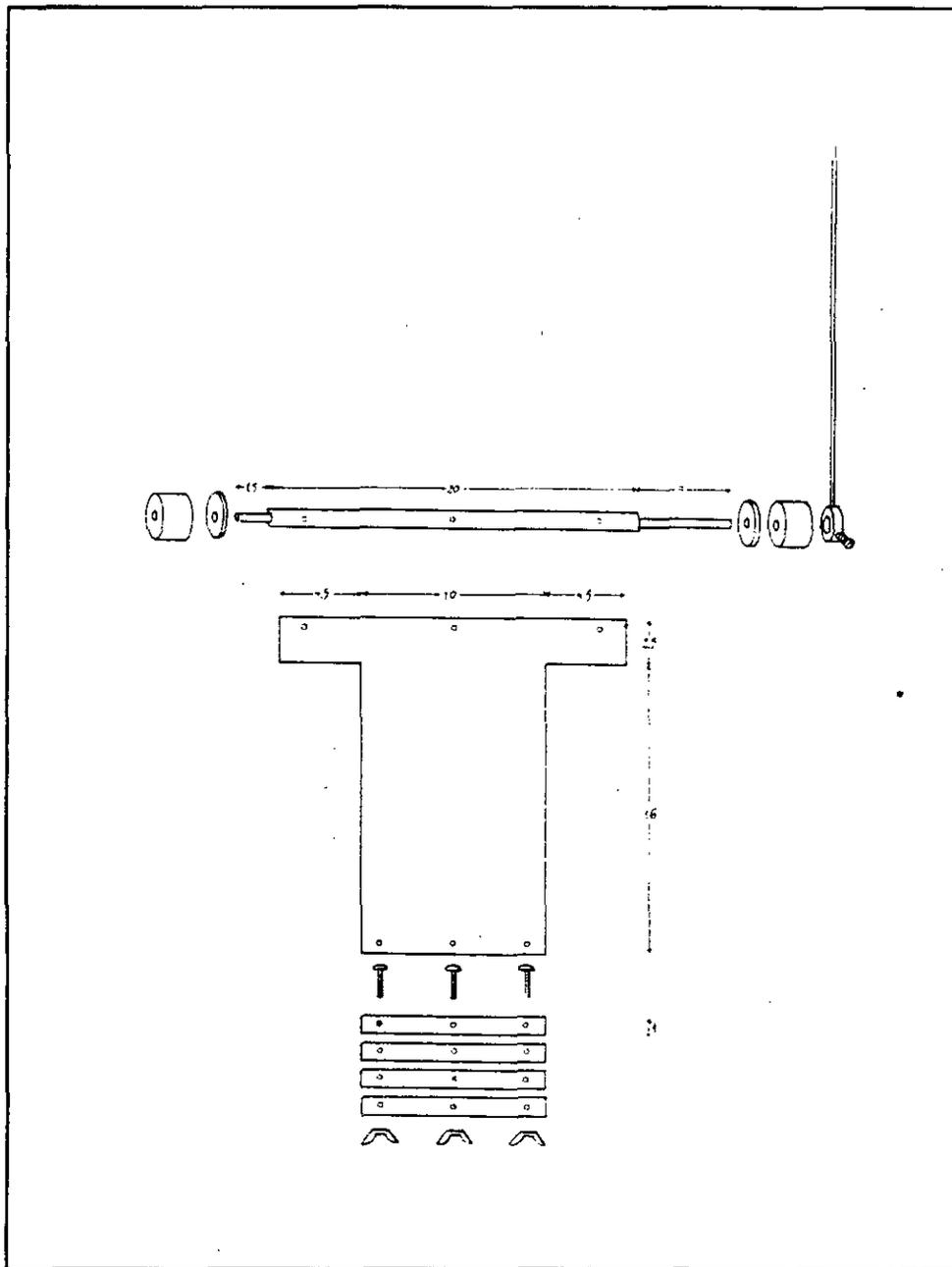


FIGURA 3: Detalle constructivo del eje y la placa del aforador de pantalla (medidas en cm).

regulable mediante una tapa corrediza graduada. Esta se abre o se cierra hasta que la carga permanece constante a un valor prefijado.

El caudal depende entonces directamente de la sección del orificio y, al ser su altura constante, depende sólo de la apertura del mismo. Esta se lee directamente en la tapa corrediza.

Dispositivos para entrega de caudales fijos, basados en la apertura del orificio de descarga, manteniendo la carga constante, son citados por ETCHEVERRY y HARDING en 1933, con el nombre de "Miner's Inch".

Se pueden marcar en la pared interna del aforador distintas alturas de carga, para trabajar con distintos rangos de caudales.

La utilizada para los datos que se presentan fue de 9,5 cm medida desde el centro de gravedad del orificio (7 cm sobre el borde superior del orificio).

Las dimensiones del aparato aseguran la contracción completa de la vena líquida, al cumplirse las siguientes condiciones (Etcheverry y Harding, 1933; King, 1939; Raggio, 1947; Ghiggia, 1981):

- los bordes del orificio están alejados 3 veces la dimensión más pequeña del orificio (15 cm) de las paredes y del piso del aforador.
- la carga es superior a 1,5 veces la altura del orificio (7,5 cm).

El aparato fue construido en madera, aunque al igual que en el caso anterior se podrían haber utilizado otros materiales.

Las medidas están detalladas en la figura Nro. 5.

Este aforador también tiene aletas en la entrada que se entierran en el fondo y paredes de la reguera para asegurar que todo el caudal circule por su interior.

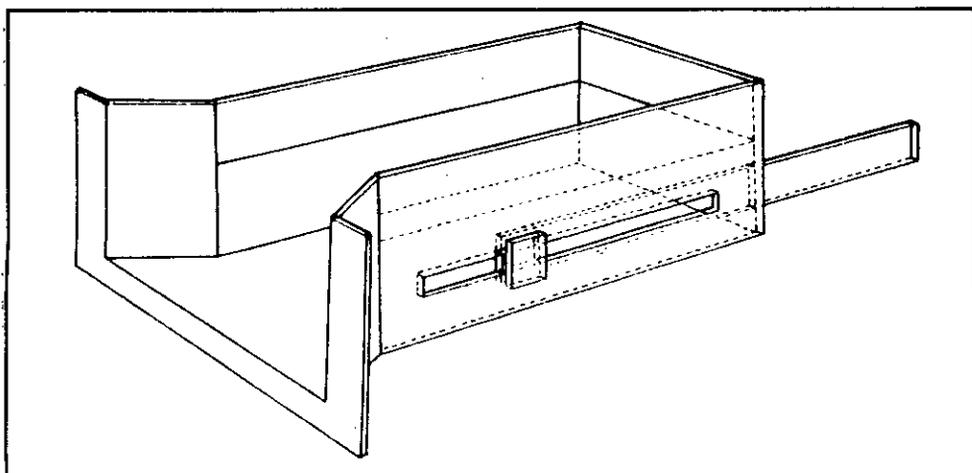


FIGURA 4: Vista en perspectiva del aforador de orificio variable.

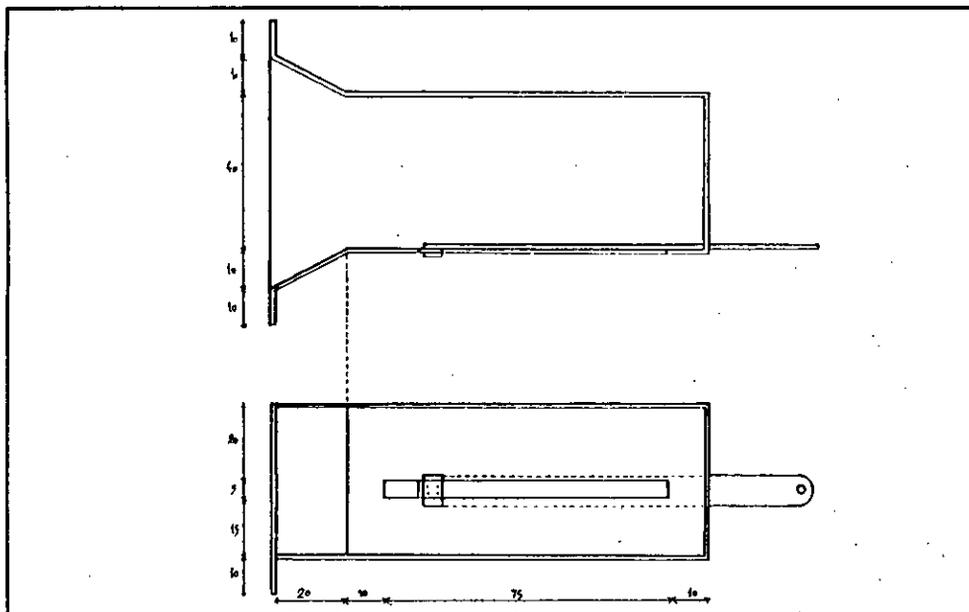


FIGURA 5: Frente y planta del aforador de orificio variable (mediadas en cm).

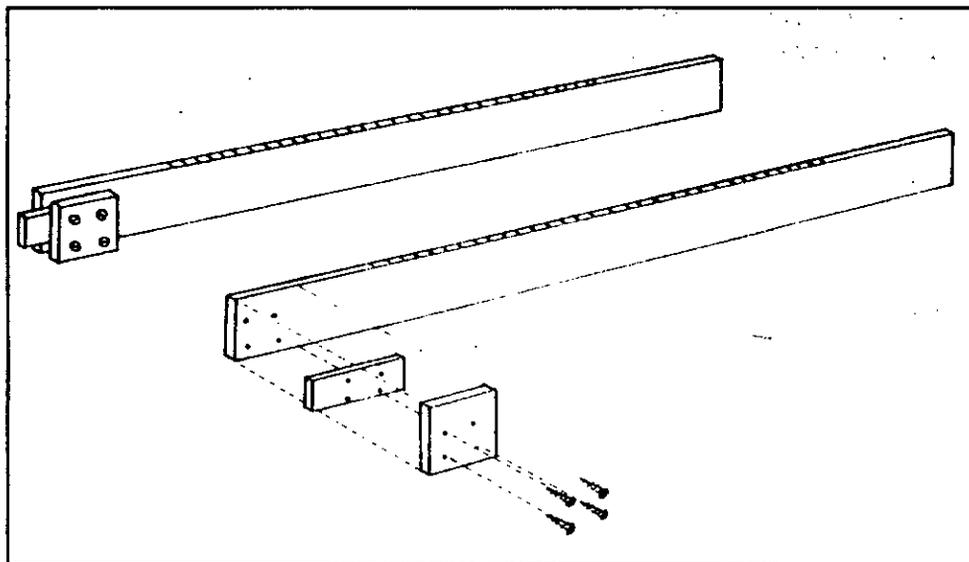


FIGURA 6: Detalle constructivo de la tapa corrediza (aforador de orificio variable).

### 3. METODOLOGIA DE CALIBRACION

Ambos aforadores fueron calibrados utilizando como método patrón el aforo volumétrico (Ghiggia, 1981) con un tanque de 0,20 m<sup>3</sup> de capacidad. Asimismo, simultáneamente se utilizó un aforador triangular de 90 grados como segundo control.

Con una electrobomba sumergible se bombearon distintos caudales, los cuales eran regulados por medio de una válvula de paso y conducidos por medio de una tubería hasta una reguera a cielo abierto.

A la salida de la tubería se realizaba el aforo volumétrico.

El ventedero triangular fue instalado inmediatamente del aforo volumétrico.

Aguas abajo, y a una distancia reducida (5-7 m), se instalaron ambos aforadores.

#### 3.1. Aforador de pantalla

El rango de caudales utilizados fue de 1,5 a 15 l/s, a intervalos de aproximadamente 2 l/s. Cada punto de aforo era obtenido cuando se lograba la estabilización del caudal y la lectura en el dial. Con los datos obtenidos se hizo el ajuste a una ecuación de regresión cuadrática ( $Q(l/s) = 0.6271 + 0.16559 G + 0.00047 G^2$ ) con un coeficiente de correlación  $r = 0.99165$  y un  $r^2 = 0.98215$ .

Simultáneamente a la calibración del aparato se tomó para cada punto la pérdida de carga ocasionada por los distintos caudales circulantes. La misma se determinó midiendo con nivel de anteojo la diferencia de nivel del pelo de agua de la reguera, aguas arriba y abajo del aparato.

Para este parámetro también se ajustó una ecuación cuadrática (pérdida de carga en cm =  $0.0046 + 0.1204 Q + 0.01824 Q^2$ ) con un coeficiente de correlación múltiple  $r = 0.99177$  y un  $r^2 = 0.98360$ .

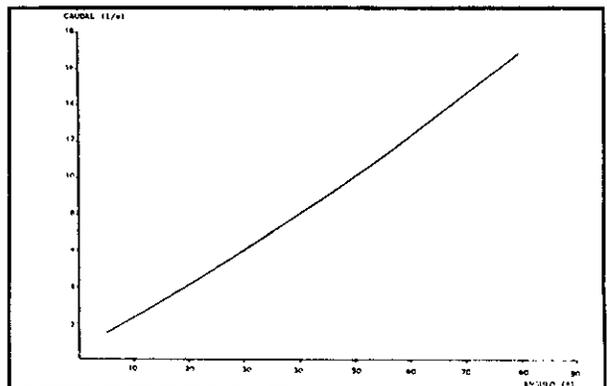
Las curvas características halladas se presentan en las figuras Nro. 7 y 10.

**FIGURA 7**

Aforador de pantalla:  
curva de comportamiento.

$$Q(l/s) = 0.6271 + 0.165596 \cdot G + 0.00047 \cdot G^2$$

$$r = 0.99165$$



### 3.2. Aforador de orificio variable

Para este caso se utilizaron caudales entre 6 y 19 l/s a intervalos de aproximadamente 2 l/s.

Con los datos obtenidos se calculó la correlación lineal existente entre el caudal erogado y la apertura del orificio, dando como resultado la siguiente ecuación lineal:

$$Q \text{ (l/s)} = -0.05945 + 0.3571 * a$$

siendo "a" la apertura en cm, con un coeficiente de correlación  $r = 0.9989$  y un  $r^2 = 0.9978$ .

Teniendo en cuenta que la ordenada en el origen, como es lógico, es prácticamente cero, se consideró despreciable.

Considerando la fórmula general de caudal de un orificio (Etcheverry y Harding, 1933; Raggio, 1947; Israelsen, 1965; Ghiggia, 1981):

$$Q \text{ (l/s)} = m * a * b * \sqrt{2 * g * h} * 10$$

donde

Q = caudal en l/s

m = coeficiente de escurrimiento del orificio

a = apertura de orificio en cm

b = altura del orificio (0,05 m)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

h = carga del orificio (0.095 m)

Para las condiciones de trabajo del aparato resulta que:

$$b * \sqrt{2 * g * h} * 10 = 0.6826$$

Por lo que

$$Q \text{ (l/s)} = m * a * 0.6826$$

Como de acuerdo a la ecuación de la recta obtenida:

$$Q \text{ (l/s)} = 0.3571 * a$$

entonces

$$m * a * 0.6826 = 0.3571 * a$$

de donde

$$m = 0.3571 / 0.6826 = 0.5231$$

Por lo tanto, para este aparato, la fórmula que estima el caudal en función de la apertura del orificio en cm es:

$$Q \text{ (l/s)} = 0.5231 * a * b * \sqrt{2 * g * h} * 10$$

considerando que existe contracción completa de la vena líquida, y asegurando condiciones de escurrimiento libre.

Las curvas características halladas se presentan en las figuras Nro. 8 y 10.

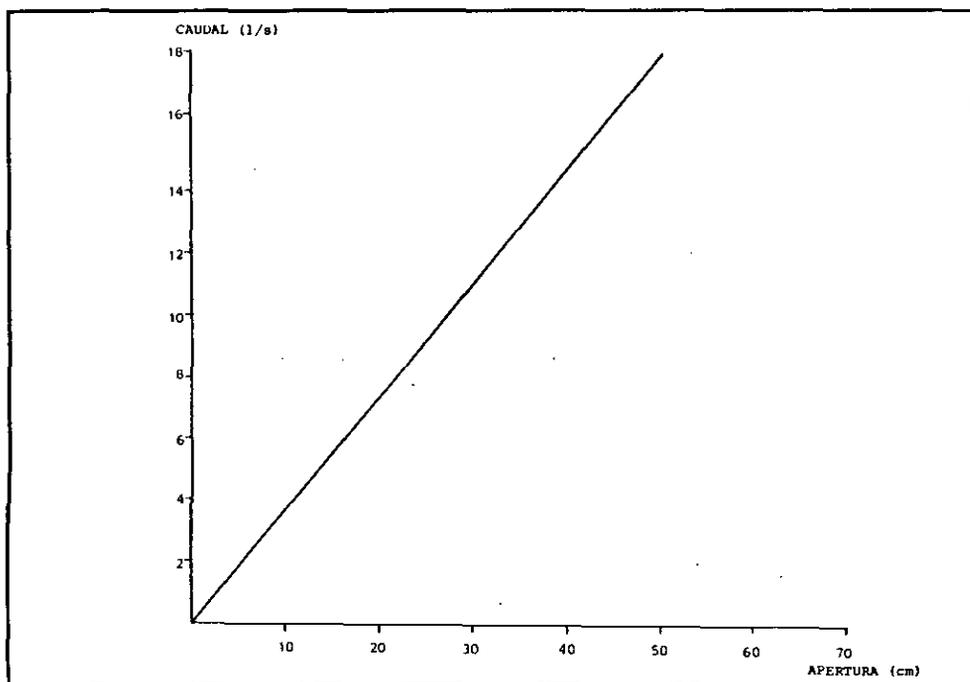


FIGURA 8: Aforador de orificio variable: curva de comportamiento.

#### 4. RESULTADOS

La comparación de los aforadores que se presentan en este trabajo fue realizada contra dispositivos clásicos: 3 vertederos y un aforador de flujo crítico.

Considerando los rangos de caudal a aforar, y la condición de conducción a cielo abierto, los dispositivos elegidos fueron:

- Vvertedero triangular de 60 grados
- Vvertedero triangular de 90 grados
- Vvertedero Cipolletti de 30 cm de cresta
- Aforador trapezoidal W.S.C. Nro. 4

Las curvas de comportamiento de estos aforadores están en la figura Nro. 9 (adaptado de Israelsen, 1966 y Ghiggia, 1981):

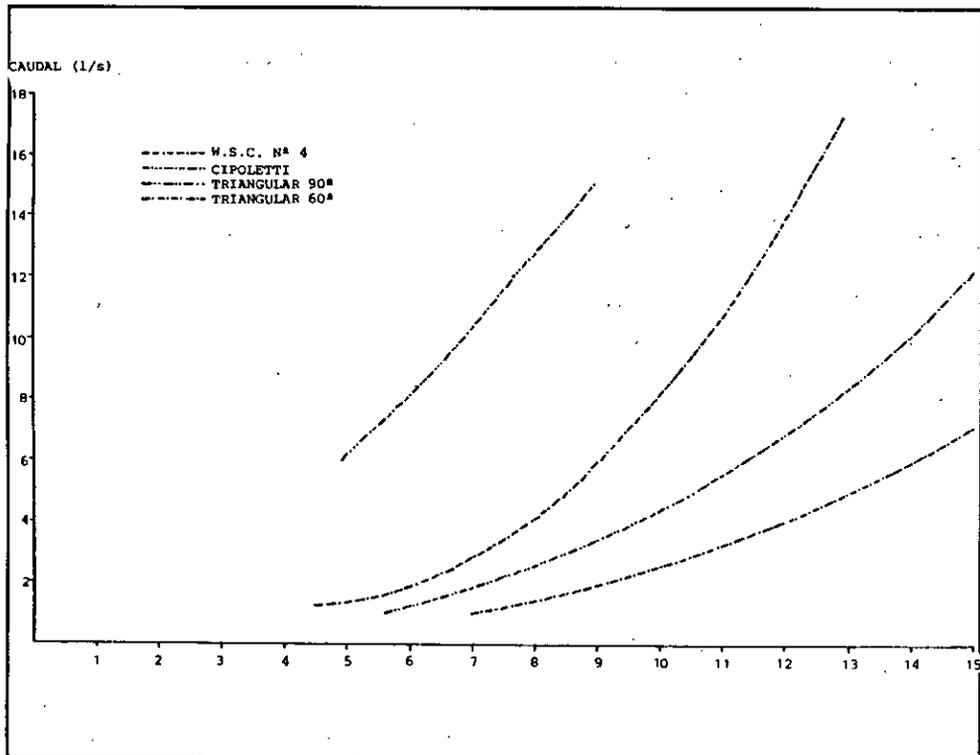


FIGURA 9: Curvas de comportamiento de aforadores.

En la comparación se consideraron 3 aspectos básicos, de acuerdo con los objetivos planteados, que son:

- pérdida de carga
- sensibilidad en la medición
- condiciones de instalación y funcionamiento

#### **4.1. Pérdida de carga**

Se consideró como pérdida de carga en todos los casos, la diferencia de nivel del pelo de agua en la reguera antes y después de los dispositivos.

En el caso de los triangulares, el Cipolletti y el de orificio variable, el nivel del pelo aguas abajo se ubicó en el vértice, la cresta, y el borde inferior del orificio respectivamente

En el caso del W.S.C. Nro. 4 se consideraron niveles de sumergencia máximos del 60% (Israelsen, 1966).

El aforador de pantalla trabajó totalmente ahogado, considerándose que esto se lograba cuando no se producía resalto hidráulico a la salida.

Tal como se puede apreciar en la figura Nro. 10, de los aforadores evaluados, el que tiene menor pérdida de carga en casi todo el rango de operación (hasta 13.5 l/s) es el de pantalla, estando esta pérdida entre 0 y 5 cm.

Lo sigue el W.S.C. Nro. 4 con una pérdida de carga ligeramente superior, situada entre 2 y 5 cm.

El Cipolletti lo sigue con una pérdida de 5 a 9 cm, con la limitante que precisa un caudal mínimo para operar de 6 l/s.

El aforador de orificio variable tiene su pérdida de carga fija en 12 cm, independiente del caudal.

Ambos aforadores triangulares son los que producen mayores pérdidas de carga en casi todo el rango de aplicación.

#### **4.2. Sensibilidad en la medición**

Para evaluar la sensibilidad en la medición se utilizaron 2 parámetros: sensibilidad absoluta y sensibilidad relativa.

La sensibilidad absoluta es la diferencia de caudal entre dos mediciones correspondientes a unidades de lectura sucesivas. Se expresa en l/s/unidad de lectura. Representa el error de medición de caudal ante un error de apreciación de lectura, a distintos caudales.

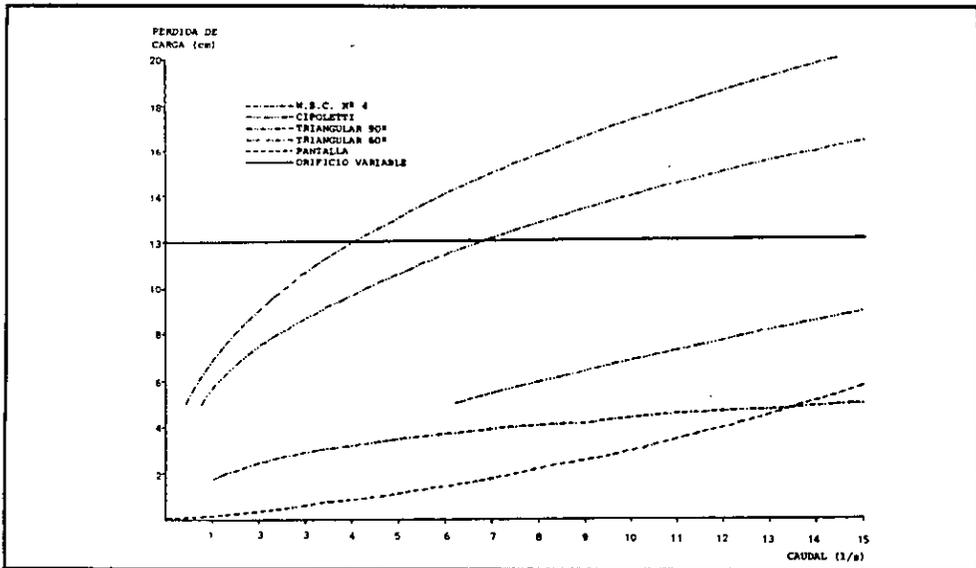


FIGURA 10: Curvas de pérdida de carga.

La sensibilidad relativa es el cociente entre la sensibilidad absoluta sobre el caudal, expresado en porcentaje. Representa el porcentaje de error en la medición a distintos caudales.

La unidad de lectura se consideró como la mínima apreciación en la medida, factible en condiciones de campo. Así, en los casos de lecturas de carga en una escala (triangulares, Cipoletti, W.S.C. Nº 4) se tomó 0.5 cm. También se tomó 0.5 cm en el caso del aforador de orificio variable. En el aforador de pantalla se tomó 1 grado.

Como se ve en las figuras Nro. 11 y 12, los menores errores de medición fueron obtenidos con los aforadores de orificio variable y de pantalla, no superando en ambos casos, y en todo el rango de operación, 0.2 l/s.

Por el contrario, el W.S.C. Nro. 4 es el que presenta mayor error de medición en todo el rango, variando éste entre 0.5 y 1.8 l/s para los caudales mínimos y máximos estudiados.

Los 3 vertederos se sitúan con sensibilidades intermedias, siendo el triangular de 60 grados el que presenta menor error (0.2 a 0.9 l/s), el triangular de 90 grados con errores algo mayores (0.2 a 1.1 l/s) y el Cipoletti errores entre 1.0 y 1.3 l/s.

Desde el punto de vista porcentual, y considerando el rango entre 3 y 15 l/s, las tendencias obviamente son las mismas, destacándose errores entre 6 y 2% en el caso del aforador de orificio variable y el de pantalla, hasta errores de 22 a 12% en el caso del W.S.C. Nro. 4

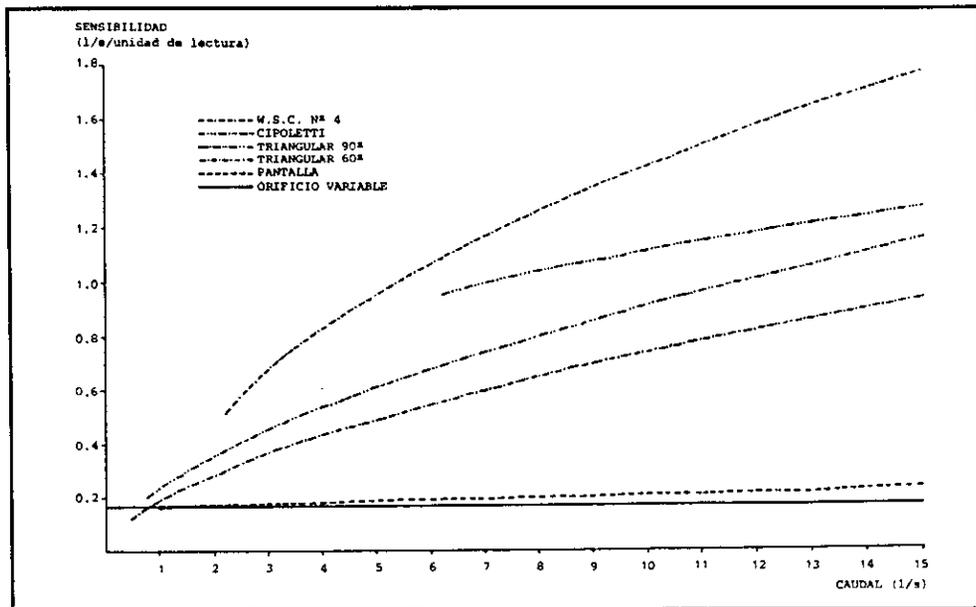


FIGURA 11: Curvas de sensibilidad absoluta.

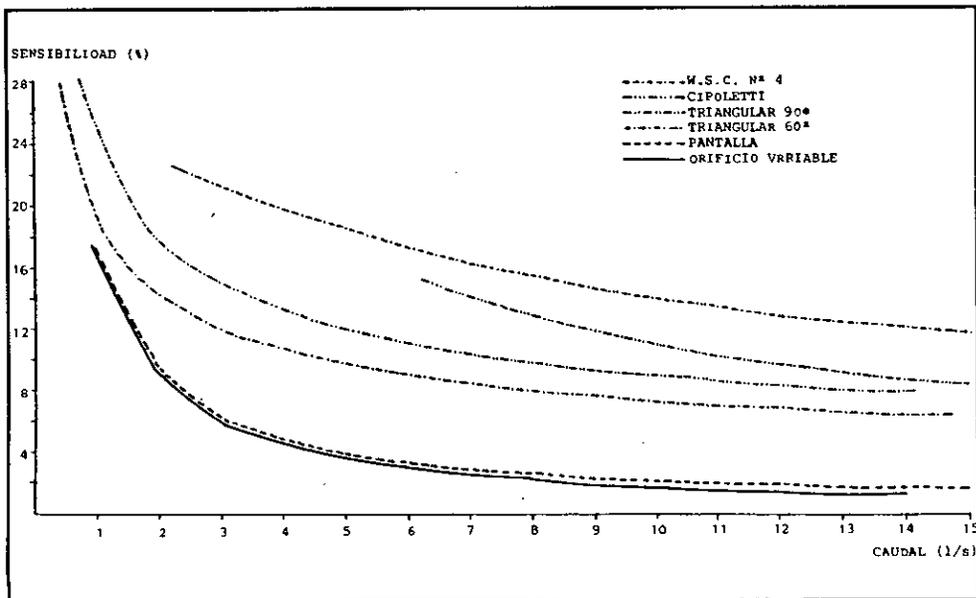


FIGURA 12: Curvas de sensibilidad relativa.

### 4.3. Condiciones de instalación y funcionamiento

Son ya conocidas las condiciones de instalación de los vertederos y del W.S.C. Nro. 4, así como sus características de funcionamiento en cuanto a depósitos de sedimentos (Israelsen, 1966; Ghiggia, 1981).

El aforador de pantalla requiere para su instalación la excavación de una fosa en la reguera. Por su forma, es sensible al depósito de sedimentos en su interior. Además, los restos vegetales arrastrados por el agua pueden alterar las mediciones, siendo necesario revisar periódicamente el comportamiento de la placa de medición.

El aforador de orificio variable requiere para su instalación una nivelación muy cuidadosa, de forma de mantener una carga constante a lo largo de todo el orificio. También se ve afectado por el depósito de sedimentos en su interior.

## 5. DISCUSION

Analizando las performances de los 2 aforadores evaluados en este trabajo, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

El aforador de pantalla constituye un dispositivo de aforo que opera con menor pérdida de carga que cualquiera de los otros estudiados. Asimismo, es mucho más preciso en las mediciones que cualquiera de los dispositivos convencionales, siendo sólo apenas superado en este aspecto por el de orificio variable.

Estas características lo hacen especialmente apto en condiciones en que se requiera una medición muy exacta del caudal, y sólo se disponga de cargas reducidas (menores a 5 cm). En dicha situación podría instalarse un aforador tipo W.S.C. Nro. 4, aunque sacrificando la precisión en la medición del caudal.

Sus principales inconvenientes son una instalación más dificultosa, y la necesidad de mantener libre de objetos extraños la cámara de la placa sensible.

Como ya quedó dicho, al no ser un dispositivo estandarizado, antes de su utilización debe procederse a su calibración y ajuste de su curva de comportamiento característica.

Con este mismo principio de funcionamiento, es posible construir aforadores mayores que trabajen con similares niveles de pérdida de carga y sensibilidad, en rangos de caudales mayores.

En cuanto al aforador de orificio variable, el mismo puede ser utilizado en un rango de caudales mayor, obteniéndose una gran precisión en la medición, superando en este aspecto a todos los dispositivos evaluados.

Las condiciones de instalación, si bien requieren de una buena nivelación del aparato, no difieren mayormente de las requeridas para cualquier vertedero.

Por su forma, se destaca la sencillez de su construcción, si lo comparamos con el de pantalla o aún con el W.S.C. Nro. 4.

Si bien en el presente trabajo se presentaron los resultados para una carga constante de 9,5 cm, el mismo puede operarse con cargas menores.

## 6. CONCLUSIONES

- Los dispositivos de aforo desarrollados resuelven las situaciones reales planteadas que limitaban el control de la derivación de agua a nivel de toma-granja en condiciones de mínima pérdida de carga admisible (especialmente el aforador de pantalla).
- Constituyen asimismo los dispositivos más precisos utilizables, en condiciones de conducción a cielo abierto.
- Por la sencillez de su construcción, no plantean a priori limitantes tecnológicas ni económicas para su utilización a nivel del país.
- Si bien fueron diseñados para condiciones específicas, pueden utilizarse sus principios de funcionamiento, adaptando sus dimensiones a otras situaciones de caudal y carga.

## AGRADECIMIENTOS:

- Al becario de I.I.C.A. Ing. Agr. Sergio Rodríguez, por su colaboración en la implementación y evaluación de los dispositivos descriptos.
- A la familia Sellanes, por su colaboración en las pruebas de campo realizadas en su fracción de la Colonia "Claude Galland".

## BIBLIOGRAFIA

- ETCHEVERRY, B.A., y HARDING, S.T. Irrigation practice and engineering. New York, Mc Graw-Hill, 1915-1933, 3v.
- GHIGGIA, R.A. Agua de corrientes superficiales e hidrometría, Montevideo, Facultad de Agronomía, 1981. 108 p.
- ISRAELSEN, O.W. y HANSEN, V.E. Principios y aplicaciones del riego. 2a. ed. Barcelona, Reverte, 1965. 396 p.
- KING, H.W. Handbook of Applied hydraulics. New York, Mc Graw-Hill Book Co Inc., 1939. 617 p.
- KRAATZ, D.B. y MAHAJAN, I.K. Pequeñas obras hidráulicas. Roma, FAO, 1976, 2 v. (FAO. Estudio sobre riego y avenamiento; 26/1 y 26/2).
- RAGGIO, S.R. Hidráulica agrícola. Bs. As., Ateneo, 1947, 528 p.