

Telemetría de niveles, caudales y volúmenes de agua en sistemas de riego por gravedad.

Bentancor, L^{a1}; Ruiz, A^b; Castaño, V^c y Durán, P^{a2}.

^aUnidad Disciplinaria de Ingeniería Agrícola, Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Avda. E. Garzón 780, 12900 Montevideo Uruguay. E-mail: a1lbentancor@fagro.edu.uy, a2pjduran@acequia-innova.es.

^bTécnico de la represa India Muerta, Dr Fonseca 1093. Lascano, Uruguay. E-mail: comisaco@adinet.com.uy

^cTécnico AgroTi., Sudestada M 327, Lomas de Solymar, Canelones, Uruguay. E-mail: vcastano@gmail.com

Línea temática A | Dinámica fluvial de embalses, estuarios y humedales

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo era lograr una tecnología de medición y transmisión de datos que mejore la gestión del uso del agua. Para ello se desarrollaron equipos que combinaron estructuras hidráulicas de aforo con registradores electrónicos dotados de sensores y elementos de transmisión de datos, y acceso a una plataforma Web. Los equipos fueron controlados mediante aforos con molinete y reglas de lectura directa. Se evaluó la eficacia en el registro y transmisión de datos y la accesibilidad remota por Internet mediante un software para PC y una App para smartphones. Se valoraron las cuotas de amortización y mantenimiento de los equipamientos. Se obtuvo el registro de caudales horarios y volumen acumulado de las temporadas de riego. Se calibraron los coeficientes de descarga de algunas estructuras pre-existentes. Los equipamientos evaluados en el presente proyecto, han resultado adecuados para controlar los caudales y medir los consumos reales de las parcelas.

Palabras clave | telemetría; aforadores; riego; arroz; canales; bombeos.

INTRODUCCIÓN

En el Uruguay se ha dado un incremento en los precios de bienes y productos agropecuarios, que hacen rentable el riego en los sistemas de producción; sin embargo se observan bajas eficiencias de riego (García Petillo, 2012).

Es necesario el uso eficiente del recurso observándose un incrementado en la presión sobre los recursos hídricos, los cuales comprometen seriamente la productividad del arroz y otros cultivos. La ineficiencia en el uso del agua aumenta los costos de producción y disminuye el área de cultivo, en cuencas con caudales reducidos. Para mejorar su uso, el primer paso es medirla, permitiendo una mejor planificación y manejo, así como también diagnosticar problemas de distribución e identificar situaciones puntuales que hacen bajar la eficiencia de los sistemas.

En los sistemas de riego colectivos del Uruguay (comunidades de regantes), el servicio de riego se cobra en base a la superficie regada sin considerar el volumen real de agua entregado. Esta tarifa no estimula un uso cuidadoso del agua, en perjuicio de la eficiencia del riego, provocando pérdidas por infiltración profunda y escorrentías innecesarias que pueden impactar en los ecosistemas ubicados aguas abajo.

Con el objetivo de lograr una tecnología de medición y transmisión de datos que permita mejorar la gestión y eficiencia del uso del agua, desde 2014 se lleva adelante el proyecto FPTA-292 “Desarrollo y evaluación de equipos para medición de agua de riego y transmisión de datos en sistemas de arroz y pasturas”. En el mismo se combinaron estructuras hidráulicas de aforo con registradores electrónicos dotados de sensores y elementos de transmisión de datos para permitir automatizar la medición, y una plataforma Web para el acceso remoto a la información.

La medición del caudal a la entrada de las parcelas está relegada por la falta de dispositivos adecuados a las condiciones de la infraestructura de riego (canales en tierra) y al alto costo de los sistemas de medición disponibles en el mercado. Las principales dificultades que presentaba la medición de caudales y el cómputo de volúmenes de riego eran las siguientes:

- a) Los altos caudales que son necesarios medir en los sistemas de riego superficial, en particular los de arroz.
- b) Los elementos en suspensión que contiene el agua son capaces de trabar las hélices o ruedas de paletas que muchos contadores utilizan, deteniendo o alterando el registro de los volúmenes entregados a los usuarios.
- c) El agua en estos sistemas de distribución, se mueve mediante pequeños desniveles (carga o presión) requiriéndose dispositivos que provoquen mínimas “pérdidas de carga”.
- d) En muchos casos la ausencia de red eléctrica en los puntos de medición, hace imprescindible que los equipos sean eléctricamente autónomos.
- e) A diferencia de los sistemas presurizados en que toda la infraestructura se encuentra normalizada con diámetros y demás dimensiones (longitudes, presiones, etc.) estandarizadas, en los sistemas de distribución por gravedad encontramos una enorme disparidad en la conformación de las conducciones y obras de control del riego.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las temporadas de riego evaluadas son 2014-15, 2015-16 y 2016-17. Se relevaron y caracterizaron puntos de medición de caudal y de control de nivel de agua, en sistemas de riego en empresas comerciales de producción de arroz, caña de azúcar y pasturas. Se seleccionaron e instalaron 28 puntos de medición, que combinaron diferentes estructuras de aforo y equipamientos electrónicos de lectura (con sensores piezo-resistivos de medición de profundidad de agua y de presión diferencial, distanciómetros electroacústicos y caudalímetros electromagnéticos) y transmisión de datos mediante conexión a Internet y envío de mensajes de texto corto (SMS) de alerta (modems gsm/gprs). Las estructuras de aforo evaluadas incluyen vertederos (triangular, rectangular y Cipolletti), tubos venturi, placas de orificio, aforadores de cresta ancha (ACA) (Figura 1, izquierda) y Sin Cuello (Figura 1, derecha), tubos y compuertas calibradas (Bos et al., 1986, Skogerboe et al., 1973, y Temeepattanapongsa 2012). Las combinaciones se detallan en la Tabla 1. Los equipamientos electrónicos fueron suministrados por la firma Acequia Innova (fabricante Español) y la firma AgroTi (importador de plaza).



Figura 1 | Izquierda, aforador ACA instrumentado con ESPAY-gprs con sensor piezo-resistivo. Derecha, aforador sin cuello N° 24 instrumentado con ESPAY-gprs con sensor electroacústico (Eco ultrasonido)

Se evaluaron diferentes combinaciones de estructuras de aforo y dispositivos para la medición de carga, caudal y volumen (según el caso), que resultan más adecuadas a las situaciones de los sistemas de riego. Estas combinaciones, denominadas “equipos”, fueron controlados mediante aforos con molinete (caudales) y reglas de lectura directa (niveles de agua).

Se controló la recolección y transmisión de datos y la accesibilidad remota mediante una plataforma web y software de acceso a la base de datos alojada en la misma.

Se valoraron y calcularon las cuotas de amortización y mantenimiento de los equipos. Se evaluó el comportamiento de la

combinación de estructuras aforadoras y sensores electrónicos, llevando en cada temporada una planilla de incidencias de cada combinación.

Se comparó el comportamiento de un sensor piezo-resistivo de medición de profundidad del agua con un distanciómetro electroacústico.

Tabla 1 | Equipos instalados de acuerdo a la situación de medición y equipamiento: regla electrónica con sensor de carga (S. Ha); sonda con sensor de presión diferencial (S.hDif).

Situación	Estructuras aforadoras y sensores
Canal luego de un bombeo	Sin cuello 21 (S hDif y S.Ha)
Parcela 140-160ha	Sin cuello 16 regla (S. Ha)
Canal luego de un bombeo	Sin cuello 24 (S hDif y S. Ha)
Caño canal/parcela	Electromagnético
Canal Secundario	ACA 1 (S. Ha)
Salida de bombeo caño 800 mm	Placa de orificio 600-800 (S hDif)
Caño canal/parcela 240ha	Electromagnético
Caño Intercambiador 700l	Electromagnético
Canal	Vertedero rectangular, regal (S. Ha)
Canal	Regla doble (dos S. Ha)
Canal max 720l/s	Sin cuello 16 (S hDif y S. Ha)
Canal max. 720l/s	ACA (S. Ha)
Salida de bombeo parcela 128 ha	Placa de orificio 600-540 (S. hDif)
Cruce camino 2 caños 1000mm	Calibración modelo (S. hDif)
Caño canal/parcela 86ha	Electromagnético
Canal a parcela 50ha	Venturi, eQpipe 500/350 (S.hDif)
Canal de riego control de nivel	Vertedero rectangular (S. Ha)
Canal a parcela 40ha	Placa de orificio 400-280 (S.hDif)
Canal de riego control de nivel	Electroacústico (ultrasonido)
Canal de riego control de nivel	Regla electrónica (S. Ha)
Canal de riego control de nivel	Regla electrónica (S. Ha)
Canal de riego control de nivel	Regla electrónica (S. Ha)
Parcela sorgo 22ha	Regla electronica (S. Ha))
Salida a parcela	Vertedero Regla electronica (S. Ha)
Salida a parcela 8ha	Venturi, eQpipe 300/160 (S.hDif)
Canal salida de represa	Vertedero triangular Regla electronica (S. Ha)
Sifón salida de represa	Venturi eQpipe 300/125 (S.hDif)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Registros de caudales y volúmenes de riego

En esta investigación se obtuvo el registro de caudales horarios y volumen acumulado a lo largo de la temporada de riego, de todos los equipos. Se puede observar la variación diaria del caudal medio horario en la Figura 2.

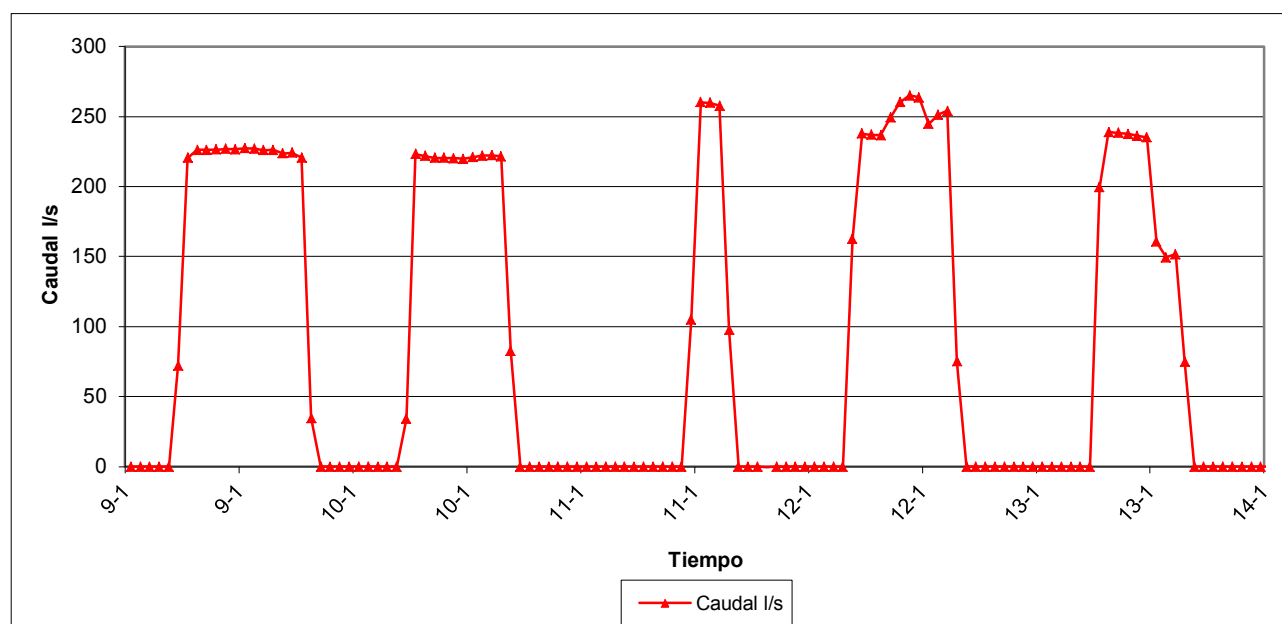


Figura 2.- Detalle de mediciones realizadas con aforador Sin Cuello N° 21 a la salida de un bombeo, donde se observa la evolución de los caudales medios horarios entre el 9/01/2017 y 13/01/2017.

Calibración de estructuras

Se calibraron los coeficientes de descarga de estructuras preexistentes (tubos de hormigón en puentes y vertedero de sifón) usadas en los aforos (Figura 3), con un coeficiente de regresión superior a 95%, lo que permitió mejorar la precisión en la medición de caudales. Asimismo se ajustaron mediante calibración los coeficientes de descarga de placas de orificio que no cumplían la norma ISO correspondiente. Se muestran a continuación algunos de los resultados con su ecuación de ajuste en Tabla 2.

Tabla 2.- Ajuste de coeficientes de caudal de varias estructuras

Estructura	Formula de caudal
Puente de doble tubo (S. presión dif.)	$Q \text{ l/s} = 486,43hDif^{0,5}$
Placa de orificio (S. presión dif.)	$Q \text{ l/s} = 140,73 hDif^{0,5}$
Vertedero-sifón regla electrónica	$Q \text{ l/s} = 207,88Hcm^{0,5169}$

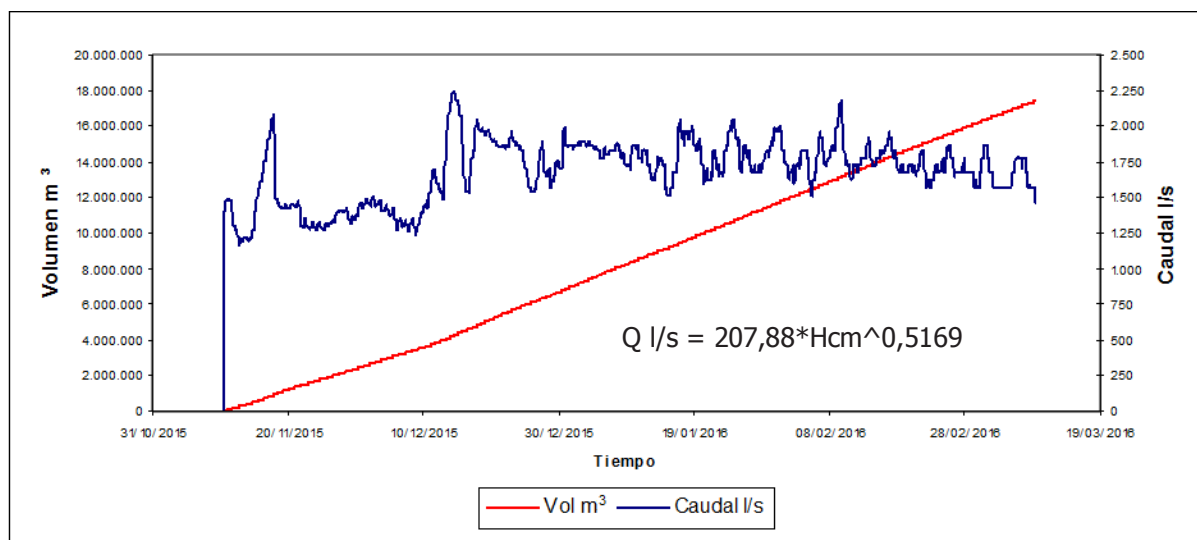


Figura 3.- Estructura calibrada paso de agua, evolución de caudales y volumen de agua en una temporada de riego (registrador ESPAY-gprs)

Consumo de agua

Se obtuvieron datos de consumo de agua de parcelas de arroz medidos con diferentes equipamientos (Tabla 3).

Tabla 3.- Consumo de agua

Situación	Equipo	Consumo (m³/ha)
Canal parcela 268 ha	Electromagnético	10.684
Parcela 128 ha	Placa de orificio / ESPAY-gprs	11.158
Estructura Calibrada 1.035 ha	Sensor de presión dif / ESPAY-gprs.	11.543
Canal de riego 1.129 ha	Vertedero rectangular / Sp Durcas	14.504
Parcela 132.7 ha	Placa de orificio / ESPAY-gprs	17.564
Parcela 390 ha	ACA / ESPAY-gprs	12.244
Parcela 210 ha	Venturi / eQpipe	14.004
Canal parcela 600 ha	Vertedero rectangular /Regla AgroTI	12.546
Canal parcela 756 ha	Sin Cuello 24/ Electroacústico	12.770

Los consumos de agua para el arroz obtenidos en el presente proyecto, se encuentran en concordancia con los consumos planteados por el manual de la FAO 66, Steduto et al (2012), donde plantea que varía entre 4,000 a 20,000 m³/ha. Por otro lado en el país se han medido consumos en un rango entre 8.300 a 13.700, en tres años consecutivos, con manejos diferentes del agua (Roel, 1999). En el caso del canal de riego donde se mide con un vertedero rectangular, al tratarse de un canal de ladera que capta el escurrimiento de una cuenca de 2.500 ha, al volumen acumulado registrado se le ha restado el escurrimiento de precipitaciones ocurridas en la temporada. El caso del alto consumo de la parcela de 132,7 ha, la topografía totalmente plana de algunos cuadros y tramos de canal obligaron a utilizar un caudal mayor para cumplir con los riegos a tiempo.

Productividad del agua

Se ha obtenido la productividad del agua total utilizada por el cultivo de arroz (riego mas precipitación) de las parcelas de, 128 ha, 210ha y 268 ha, resultando en valores de 0.6 kg/m^3 , 0.55 kg/m^3 y 0.66 kg/m^3 respectivamente. Según se indica en el manual de la FAO 66, Steduto et al (2012), la productividad del agua varía entre 0.2 y 1.2 kg/m^3 . Otros valores encontrados en el país están en el entorno 0.5 a 0.9 kg/m^3 (Roel, 1999). Las parcelas evaluadas en éste trabajo, se encuentran dentro de los rangos encontrados en la bibliografía.

Precisión en la medición del caudal

En la búsqueda de equipamientos cada vez más precisos se realizó la comparación de las lecturas de carga realizados por dos equipos de la firma Acequia Innova, uno de los cuales estaba provisto de un sensor piezo-resistivo y el otro un sensor electroacústico (eco de ultrasonido) Se presenta en Figura 4, la comparación de ambos sensores, donde se aprecia la gran estabilidad de las lecturas del electroacústico.

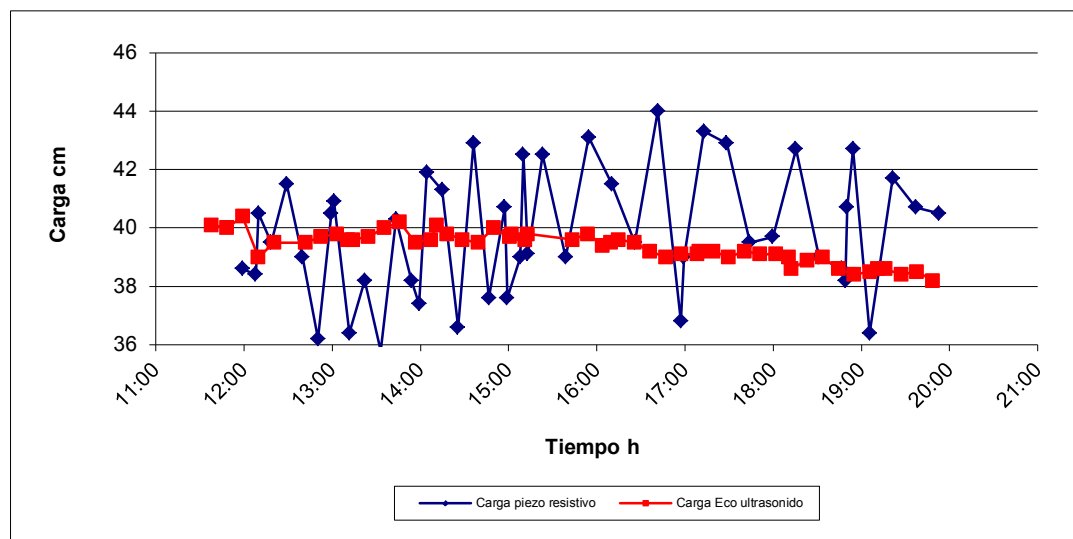


Figura 4.- Comportamiento de los sensores piezo-resistivo y Eco ultrasonido

Software de comunicación

Se ha obtenido una página Web amigable donde se puede hacer un manejo de la base de datos de usuarios, equipos y registros con capacidad para recepcionar los datos transmitidos. Se llegó a implementar un acceso jerárquico de usuarios, con seguridad de identificación (usuario y clave). Se desarrolló un mecanismo de respaldo de información que asegura su conservación, además del diseño de una base de datos con funcionalidades como la representación grafica de valores, visualización y cambio de alarmas, posibilidades de bajar y guardar la información en archivos Excel, etc., ver Figura 5.

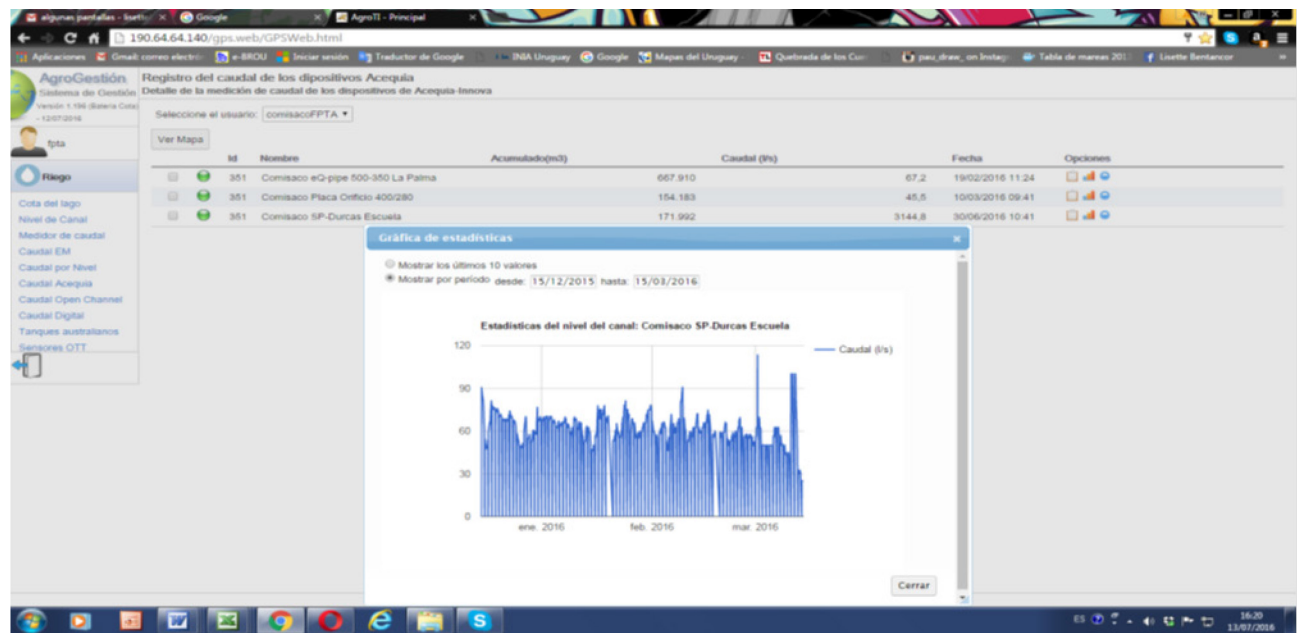


Figura 5.- Imagen de la pagina web con algunas funcionalidades del sistema

El registro continuo de los caudales en diferentes puntos del sistema de riego ha permitido analizar la operación del mismo y detectar anomalías, tales como fugas de canales, extracción no autorizada de agua, maniobras equivocadas de compuertas, etc. Lo anterior unido al sistemas de alerta vía sms y la aplicación para celulares (App para Android) de lectura remota instantánea de los medidores han resultado de enorme utilidad en la supervisión de la operación de extensas redes de canales (Figura 6)

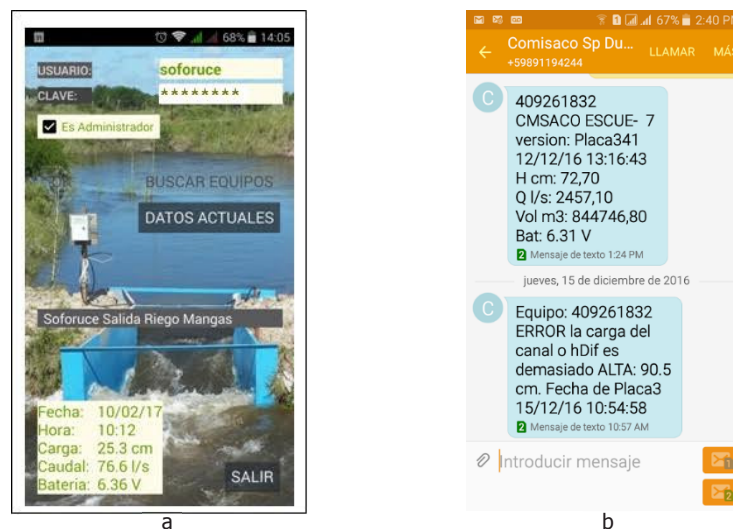


Figura 6.- Imagen de un teléfono celular mostrando en a- la App y en b- dos sms, arriba con los datos instantáneos que registra y abajo con alarma por una lectura de carga demasiado alta (sobre el umbral prefijado).

Se desarrolló un programa para acceder directamente a la base de datos de los equipos de Acequia Innova y permitir la reprogramación remota de los mismos con una nueva versión (1.8) del programa de Control Remoto de Equipos el que presenta mayores prestaciones (Figura 7).

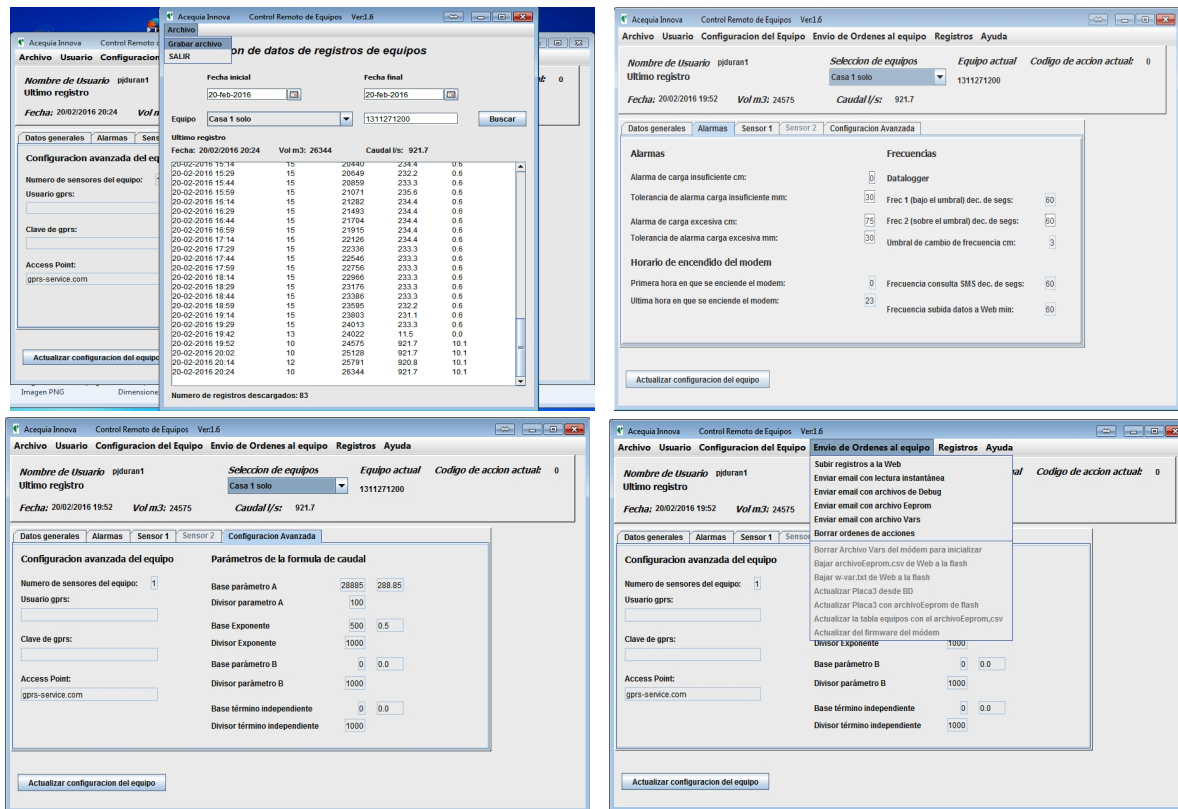


Figura 7- Programa Control Remoto de Equipos (CRE v 1.8) Acequia Innova

Análisis económico

Respecto al análisis económico de la tecnología implementada, se presenta a continuación el costo total, amortización y mantenimiento anual de algunos equipos instalados en parcelas y en canales con áreas de riego conocidas (Tabla 4).

Las cuotas de amortización, resultan altamente dependientes del área regada en cada chacra y se han obtenido valores, en la mayoría de los, casos muy adecuados en relación al costo del servicio de riego. La mayoría de los equipos tienen una cuota de amortización menor al 5 % del costo de riego. Por ejemplo: una placa de orificio, con la estructura de aforo y su electrónica, el área mínima de riego deberá ser 50ha y para un equipo electromagnético el área mínima deberá ser 85ha. Para el caso de estructuras de control de paso de agua con control de nivel, el área mínima es de 40ha.

Tabla 4.- Amortización y mantenimiento de los equipos (US\$/ha)

Equipo	Costo total US\$	Amortización anual US\$/ ha	Mantenimiento Anual US\$/ ha	Área de riego ha
ACA Acequia Innova	2.690	2,70	0,57	261
Sin cuello 24 electroacústico Acequia Innova	3.492	1,13	0,23	756
Caudalímetro Electromagnético Seametrics	4.650	15,09	0,26	76.7
Caudalímetro Electromagnético Darhor	3.329	3,22	0,30	268
ESPAY –gprs Acequia Innova	1.078	0,26	0,02	1081
Regla electrónica AgroTi	1.836	0,60	0,03	777
Placa de orificio 800/600 Acequia Innova	3.365	1,33	0,24	630
Placa de orificio 400/280 Acequia Innova	1.740	11,88	2,50	40
Placa de orificio 600/540 Acequia Innova	1.804	4,13	1,17	128
Orificio de fondo Acequia Innova	1.108	14,7	2,27	22
eQpipe 500/350 Acequia Innova	3.609	19,31	3,00	50
eQpipe 300/160 Acequia Innova	2.491	94,72	18,75	8
Electroacústico AgroTi	2.459	0,35	0,15	2657

CONCLUSIONES

Todos los aforadores de lámina libre (ACA, Sin Cuello, vertederos triangular, rectangular, Cipolletti) en conjunción con medidores de carga (reglas electrónicas y sensores de presión diferencial), resultaron muy adecuados para la medición en canales. Debe prestarse especial atención a la forma de instalación de los aforadores para lograr las condiciones requeridas para un buen funcionamiento en el rango de caudales utilizado en cada sitio.

Los órganos deprimógenos (venturis y placas de orificio) con sensores de presión diferencial, son adecuados para rangos de caudales acotados, tales como bombeos y derivaciones más o menos fijas, aunque requieren mayor carga disponible. En particular las placas de orificio se adaptan muy bien ya que es posible ajustar el tamaño del orificio y tienen un costo menor que los venturi.

Las estructuras existentes en los sistemas de riego se han podido calibrar mediante aforos con molinete, obteniéndose coeficientes para una fórmula de caudal en función de la carga medida por los equipos electrónicos.

Los equipamientos evaluados en el presente proyecto, han resultado adecuados para controlar los caudales y medir los consumos reales de las chacras, en toda la gama de situaciones de aforo estudiadas.

Los sensores electroacústicos resultan tener mayor precisión y estabilidad en la medición de la carga que los piezo-resistivos.

La transmisión vía módem ha requerido varios ajustes del software (en algunos equipos) para optimizar la conectividad, lográndose mejoras, sin pérdidas de datos. Existen ventajas de los equipos dotados de datalogger por la mayor seguridad de los datos que pueden recuperarse mediante descarga vía cable a un computador, en caso de fallos en la transmisión telefónica.

La programación de interfase de usuario y la plataforma Web han funcionado adecuadamente. La App desarrollada para

smartphone que permite el acceso remoto a la medición instantánea de los equipos, ha resultado especialmente útil para el manejo de la red.

El sistema de alarmas de los equipos ha resultado muy útil para el control del agua en la red de canales y en las chacras.

Las cuotas de amortización, resultan altamente dependientes del área regada en cada chacra y se han obtenido valores en algunos casos muy adecuados en relación al costo del servicio de riego.

El conocer la evolución de los niveles de agua en los canales, los caudales y los volúmenes de agua distribuidos por la red de canales y acequias, permite a los administradores de los sistemas de riego mejorar la gestión) y aumentar el área de producción con las mismas fuentes de agua. Por otra parte, conocer el volumen real consumido por el cultivo es una herramienta útil para el productor para mejorar la eficiencia de riego, y la productividad del agua (kg de arroz por m³ de agua consumido).

AGRADECIMIENTOS

Al I.N.I.A. por el financiamiento del proyecto presentado y la utilización de su infraestructura.

A las empresas COMISACO, SAMAN, GLENCORE, CASARONE, COOPAR TOBIR y SOFORUCE por la utilización de su infraestructura de riego y la colaboración de sus técnicos en la realización de medidas.

Se agradece a la empresa ACEQUIA INNOVA (España) por la donación de equipos de aforo y telemetría y la colaboración en la instalación y mantenimiento de los mismos.

REFERENCIAS

Bos, M.G., J. A. Replogle & A. J. Clemmens. 1986. "Aforadores de caudal para canales abiertos". *Publication 38, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI*, Wageningen, The Netherlands.

Steduto P., T. Hsiao, E. Fereres y D. Raes 2012 Rendimiento de los cultivos al agua. *Estudio FAO Riego y drenaje 66* Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma (Italia).

García Petillo, M.(2012) Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. 2do. *Seminario Internacional Riego extensivo en cultivos y pasturas*. Noviembre 6-7 . Salto. Uruguay, pp. 23-32

Roel, A. (1996). Manejo eficiente de la inundación. *Riego en arroz*. INIA Treinta y Tres Boletín de divulgación N° 67. 16pp

Skogerboe, G. V., R. S. Bennett & W. R. Walker. 1973. Selection and Installation of Cutthroat Flumes for Measuring Irrigation and Drainage Water. Colorado State University, Experiment Station, Fort Collins, *Technical Bulletin 120*. 75p

Temeeppattanapongsa, S. 2012. Unified Equations for Cutthroat Flumes Derived from a Three-Dimensional Hydraulic Model. *All Graduate Theses and Dissertations*. Paper 1308.