



Desarrollando una red de monitoreo hidrológico en zonas carentes de datos usando registradores de datos de código abierto de Arduino

Silja V. Hund,* Mark S. Johnson y Tom Keddie
Mayo, 2017

Ideas principales

- Un código abierto innovador de bajo costo.
- Se desarrolló un registrador de datos basado en Arduino.
- El registrador de datos fue desarrollado para el monitoreo hidrológico en cuencas hidrográficas localizadas en los trópicos.
- El registrador de datos de Arduino tuvo un funcionamiento robusto después de superar los retos iniciales.
- El sistema tiene un gran potencial para el monitoreo ambiental automático y continuo.

Resumen: El continuo monitoreo hidrológico es limitado en muchas regiones del mundo, creando serias brechas de conocimiento para gestores y científicos de los recursos hídricos. Avances recientes de *software* de código abierto y tecnologías de *hardware*, tales como el proyecto Arduino, muestran potencial para el desarrollo de registradores de datos automáticos de bajo costo (~ US\$100) requeridos para la recopilación continua de datos. Nosotros desarrollamos un registrador de datos basado en Arduino (el *Ecohydro Logger*) unido a sensores hídricos que proveen la salida digital para establecer una red de monitoreo hidrológica en una zona con carencia de datos de los trópicos húmedo-secos de Guanacaste, Costa Rica. Mientras experimentamos algunos retos con una primera iteración de nuestro registrador de datos, una versión mejorada fue robusta y capaz de capturar largos periodos de flujos de datos de alta frecuencia. La integración del programa de monitoreo en las comunidades locales fue también clave para el despliegue exitoso, permitiendo el intercambio del conocimiento local y el apoyo. La accesibilidad y el bajo costo del registrador de datos basado en Arduino puede extender de manera significativa el monitoreo ambiental continuo en regiones con carencia de datos.

La escasez de agua y las inundaciones afectan comunidades alrededor del mundo, pero el monitoreo hidrológico necesario para informar adecuadamente sobre la gestión de los recursos hídricos y el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático, son limitados en muchas regiones [1; 2]. Las metas de la actual Década Internacional de Hidrología Científica (2013-2022); Montanari [1] resalta este reto, con llamados para el desarrollo de nuevas e innovadoras técnicas de monitoreo para mejorar plataformas de monitoreo hidrológico, redes y bases de datos necesarias para la toma de decisiones bien informadas, relacionadas con la gestión de los recursos hídricos. Los sistemas de registro de datos son esenciales para la investigación hidrológica y el manejo de sistemas ambientales y agrícolas, para proveer datos en alta resolución temporal necesaria para dilucidar la naturaleza episódica de sistemas hidrológicos dinámicos. Uno de los retos para extender las redes de monitoreo hidrológico continuo es el alto costo de los registradores de datos convencionales y de los sistemas de adquisición de datos. Avances recientes de *software* de código abierto y tecnologías de *hardware* muestran potencial para el desarrollo de sistemas de registradores de bajo costo que pueden ser desplegados con alta cobertura espacio-temporal.

* S.V. Hund (shund@coas.ubc.ca), M.S. Johnson, Dept. of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences & Institute for Resources, Environment and Sustainability, Univ. of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, V6T 1Z4; T. Keddie, Vancouver, BC, Canada.

La versión original se titula *Developing a Hydrologic Monitoring Network in Data-Scarce Regions Using Open-Source Arduino Dataloggers* y se encuentra en: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/ael/articles/1/1/160011>

Cuando se desee citar esta información debe utilizarse la referencia original en inglés de la siguiente forma:

Hund, S.V., M. S. Johnson, and T. Keddie. 2016. Developing a Hydrologic Monitoring Network in Data-Scarce Regions Using Open-Source Arduino Dataloggers. *Agric. Environ. Lett.* 1:160011. Doi:10.2134/ael2016.02.0011

El proyecto Arduino (<http://www.arduino.cc>) está basado en una plataforma microcontrolada electrónica de código abierto, programada usando software libre, al cual varios sensores digitales y análogos pueden estar conectados. El proyecto adopta la filosofía de los proyectos de código abierto (con acceso abierto a la fuente de código y esquemas de *hardware*), y es conducido por una amplia comunidad usuaria internacional para continuar las mejoras, desarrollos y aplicaciones de la tecnología [3].

El desarrollo continuo del proyecto Arduino como un registrador de bajo costo ambiental incluye el ALog [4] y el *Mayfly Logger* (*Stroud Water Research Center*) [5]. El registrador de datos basado en Arduino muestra un gran potencial para extender redes de monitoreo hidrológico, pero es todavía una tecnología incipiente. Mientras algunos estudios han explorado el potencial para usar a Arduino para la hidrología [6; 5] y otros monitoreos ambientales [7; 8], las aplicaciones de campo que abarquen condiciones extremas o periodos de tiempo más largos son poco comunes.

En esta nota, presentamos nuestros avances de un registrador de datos basado en Arduino, hacia el establecimiento de una red de monitoreo hidrológica en una región con escasez de datos de los trópicos, y compartir los retos enfrentados y los éxitos obtenidos con esta nueva tecnología sobre un periodo de monitoreo cercano a los dos años.

Método

Sitio de implementación

Implementamos una red de monitoreo hidrológica en las cuencas hidrográficas de los ríos Potrero (37 Km²) y Caimital (38 Km²), cerca de Nicoya, en la provincia de Guanacaste, Costa Rica (10° N, 85°O). La región está caracterizada por un clima tropical húmedo-seco (traducido a 2232 mm de lluvia al año), con precipitaciones intensas durante la estación lluviosa, que va de mayo a noviembre, y una larga estación seca anual que va de diciembre a abril [9]. En las comunidades agrícolas rurales de la región durante la estación seca, el agua es disputada entre la agricultura, los usos domésticos y los usos turísticos, con muchas comunidades experimentando escasez [10]. En la región, los datos hidrológicos continuos de alta frecuencia son virtualmente inexistentes, creando brechas de conocimiento para la gestión de los recursos hídricos.

Establecimiento de la red de monitoreo

Las estaciones de monitoreo fueron instaladas en las cabeceras de los ríos Potrero y Caimital, a través de arroyos de tercer orden (cinco estaciones en total para ambas cuencas). El monitoreo inició en marzo de 2014 y continúa en el presente. Se establecieron sólidas relaciones con actores locales, por medio de una serie de talleres relacionados con el proyecto FuturAgua (www.futuragua.ca), para identificar brechas de datos clave y para lograr un acercamiento con los dueños de propiedades adyacentes a los arroyos.

En cada estación de monitoreo, una combinación de sensores conductivos de profundidad del agua, y de temperatura (modelo CTD, *Decagon Devices*) fue desplegada para medir estos parámetros a un intervalo de 10 minutos, vía un registro de datos de Arduino. Las calibraciones de fábrica de los sensores CTD fueron probadas en el laboratorio previo a la instalación en el campo y otra vez entre los meses de setiembre y diciembre de 2015, usando procedimientos estándares recomendados por *Decagon Devices*. Conforme los sensores CTD producen una señal digital, no existe una calibración típica como ocurre con los sensores análogos. Adicionalmente, nosotros realizamos mediciones físicas mensuales de la altura del agua y mediciones discretas de la conductividad eléctrica y de la temperatura del agua usando sensores manuales independientes. Estas mediciones mensuales fueron usadas para acceder a datos de calidad obtenidos de los sensores conectados a los registradores de datos.

El sensor se instaló en la base del cauce principal del arroyo y estuvo protegido por un tubo de cloruro de polivinilo (PVC). El tubo y el sensor fueron asegurados contras las raíces y los árboles ubicados a lo largo de la ribera del río, para lograr la estabilidad durante corrientes ocasionadas por tormentas (Fig. 1). El sistema es accionado por dos paneles solares (21.9 V/10W) que se conectan a un controlador de carga solar, proveyendo energía para recargar baterías de gel de 12 V/7. Los datos son bajados de la tarjeta *Secure Digital* (SD) una vez por mes.

Desarrollo de Arduino

El panel de Arduino consiste en un pequeño microcontrolador con un procesador, un reloj, conexión USB y puertos de entrada análogos y digitales. Una rama de tarjetas opcionales (*Arduino shields*) pueden agruparse sobre el panel de Arduino para extender las capacidades y añadir características extra. Nuestra primera versión del sistema de adquisición de datos de la base de Arduino fue desarrollado usando un panel Arduino Mega 2560, combinado con una tarjeta protectora estándar Arduino SD.

El Arduino fue programado en el IDE *software* de Arduino de código abierto (C/C++), por medio de un cable USB para consultar lecturas del sensor CTD cada 10 minutos y grabar los datos en una tarjeta SD. Un componente clave del programa, la biblioteca del *Serial Digital Interface* (SDI), fue desarrollada por *Stroud Water Resources Center* (<https://github.com/StroudCenter/Arduino-SDI-12/>). Estos paneles de Arduino fueron desplegados con los sensores durante el primer año de monitoreo (marzo 2014-abril 2015).

Subsecuentemente, diseñamos un sistema de adquisición de datos basado en Arduino y lo instalamos en abril 2015 (Fig. 1). Este *Ecohydro Logger* incluye una tarjeta personalizada combinada con un panel Arduino Mega 2560. Para reducir el consumo de energía del panel Arduino Mega, la fuente de energía serial fue deshabilitada con una derivación y con la remoción de todas las luces LED. La tarjeta personalizada incluye un lector de tarjeta SD firmemente acoplado, fusibles para el controlador de carga solar y la batería, terminales de tornillos para conexiones de cable más estables. Además implementamos un Reloj de Tiempo Real (*Real Time Clock DS 1306*), con una función despertador para permitir un apagado casi completo del sistema entre mediciones.

Fueron usados el SDI-12, el DS1306 (<https://github.com/cjbearman/ds1306-arduino>) y el *Low Power* (<https://github.com/rocketscream/Low-Power>) de bibliotecas de Arduino.

En *GitHub* (<https://github.com/UBCecohydro/Ecohydro.Arduino>) está disponible el código de programación del *Arduino Ecohydro Logger* y el código para el procesamiento de datos (usando el lenguaje de programación R), así como los detalles del *hardware* incluyendo los circuitos eléctricos diseñados para el *Ecohydro Logger*.

El costo de nuestro *Ecohydro Logger*, incluyendo el panel Arduino Mega y el protector *Ecohydro*, es de aproximadamente US\$ 100, en contraste con el registrador de datos de bajo costo de *Campbell Scientific*, el CR200X, actualmente valorado desde los US\$ 480. El *Ecohydro Logger* es altamente compatible y puede ser conectado a cualquier SDI o sensor análogo. En el diseño actual, hasta ocho sensores pueden conectarse al mismo tiempo. Dado el planteamiento de hardware de código abierto, el registrador de datos es altamente personalizable para las necesidades de los investigadores. Por ejemplo, la plataforma podría ser extendida para incluir la carga de datos automatizada para el internet, por medio de añadir una tarjeta GSM a la plataforma.

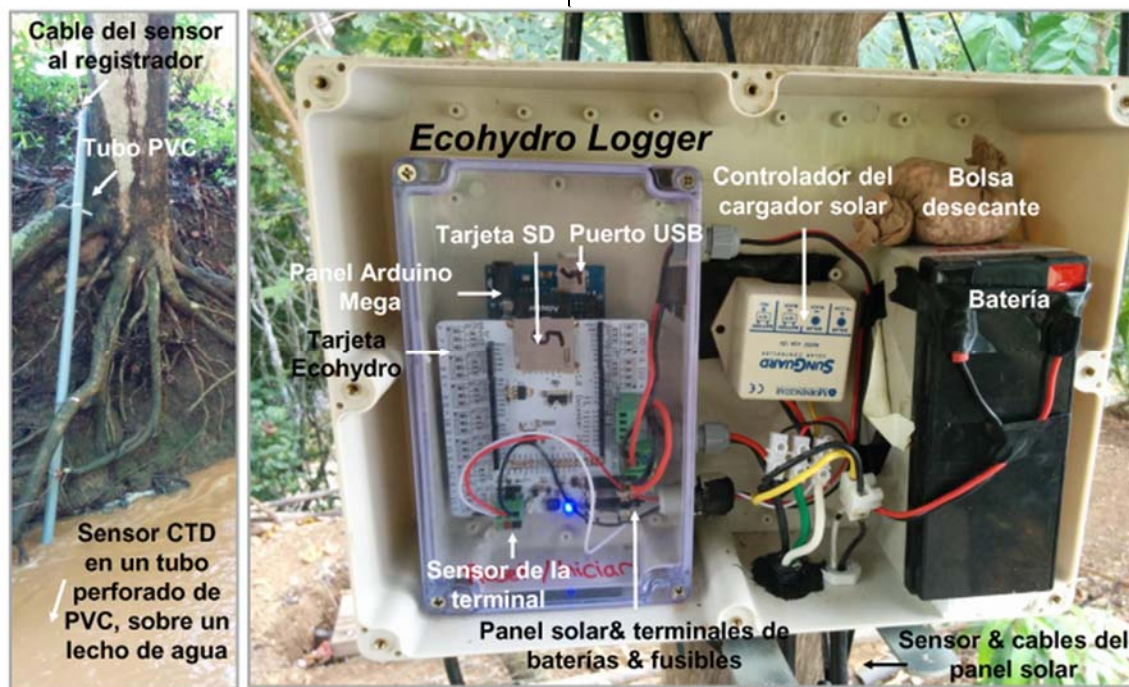


Fig. 1. Establecimiento del sitio de monitoreo hidrológico en el río Potrero, Costa Rica. El sistema *Ecohydro Logger* de adquisición de datos basado en Arduino está conectado al sensor CTD (*Decagon Devices*) (conductividad eléctrica, temperatura, profundidad del agua). El sistema está remotamente localizado y accionado por paneles solares.

Resultados y discusiones

El *Ecohydro Logger*

Un escenario temporal del río obtenido por medio del registro de datos continuos y automáticos (10 min), es presentado en la Fig. 2. Aquí se muestra como datos en bruto, con vacíos y problemas, con el fin de llamar la atención sobre las capacidades y retos experimentados con la configuración de Arduino durante el desarrollo del sistema de adquisición de datos. Hubo múltiples razones que se explican en este escenario temporal (Fig. 2), incluyendo aquellos factores típicos de las instalaciones en localidades remotas (problemas con sensores y una interrupción de la conexión de un panel solar debido a la caída de una rama), y aquellas relacionadas con el desarrollo en curso del sistema de adquisición de datos basado en Arduino (problemas de energía particularmente durante la época lluviosa, en la cual aumentó la cobertura de nubes y creció la vegetación, la desconexión de cables, y errores de códigos relacionados con un cambio de fecha). El nuevo *Ecohydro Logger* superó las limitaciones experimentadas con la primera versión, y la pérdida de datos ha sido minimizada desde la instalación del nuevo sistema. El reducido consumo de energía, de 80mA (promedio) a 16 mA (en promedio, considerando ambos ciclos, “dormido” y “despierto”), y la adición de terminales (*Arduino screw terminals*) significativamente aumentó la resistencia de la plataforma cuando se desplegó en el campo.

A pesar de las condiciones extremas de lluvia y sequía de los trópicos (con altas temperaturas en el aire y contenido de humedad en la estación lluviosa), el desenvolvimiento del *Ecohydro Logger* fue bueno, incluso cuando estuvo localizado dentro del bosque lluvioso, y la instalación con el sistema de doble caja (Fig. 1) probó ser confiable.

El *Ecohydro Logger* logró capturar largos periodos de flujos de datos de alta frecuencia, grabando la llamativa naturaleza de respuesta del caudal del arroyo a las precipitaciones, previamente no disponibles en esta región. La versión modificada del sistema también permitió elaborar curvas de índice de descarga usando el método de conductividad [11], lo que representa otra prueba de concepto para la extensibilidad de la plataforma base descrita aquí.

Aplicaciones para sociohidrología

La integración de los esfuerzos de monitoreo dentro de las comunidades locales es crítica para el establecimiento o la extensión de redes exitosas de monitoreo hidrológico [12]. Esto es consistente con un abordaje para el estudio de sistemas de acoplamiento de los seres humanos y el agua, conocidos como sociohidrología [13]. Abordajes prácticos e inclusivos pueden ayudar a asegurar la aceptación y seguridad de las estaciones de monitoreo. Además, un abordaje participativo que activamente involucre actores locales puede mejorar el intercambio del conocimiento con comunidades e incorporar los resultados del monitoreo en decisiones de la gestión del agua [12], integrando el conocimiento ecológico tradicional.

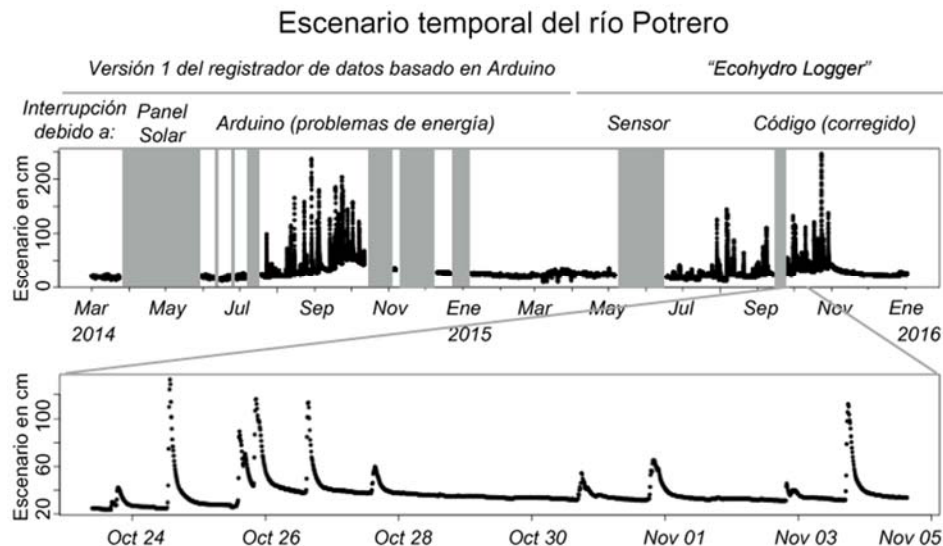


Fig. 2. Escenario temporal del nivel del río (datos sin procesar, intervalos de 10 min) recolectados usando los sistemas de adquisición de datos de código abierto basado en Arduino. Los datos presentados corresponden a la estación de monitoreo localizada en el río Potrero (10°07'27" N, 85°25'44" O), 600 metros río arriba de su confluencia con el río Grande en Costa Rica. El área de drenaje para este sitio es 35 km². La figura incluye referencias a causas de interrupción de datos durante el desarrollo del sistema.

Esto podría ser relevante particularmente cuando la investigación es conducida en áreas pobladas, tales como comunidades de pequeños agricultores. Integrarse en la comunidad local a través de talleres y cultivando relaciones con propietarios de zonas de monitoreo, son componentes importantes del programa de monitoreo hidrológico en las cuencas de Potrero y Caimital. Muchos de estos propietarios desarrollaron estrategias para el monitoreo de las estaciones, notificando a investigadores si había problemas en el lugar.

Conclusiones

El sistema de adquisición de datos basado en Arduino caracterizado por ser de código abierto y bajo costo, puede ser un recurso poderoso para la ampliación de redes de monitoreo hidrológico, en regiones donde el monitoreo de alta frecuencia es limitado. En particular, en los trópicos con estaciones secas y lluviosas marcadas, a menudo se experimenta escasez de agua que representa retos significativos para las comunidades. Una creciente base de datos hidrológicos y el entendimiento, podrían contribuir en la gestión del agua y en las estrategias de adaptación al cambio climático. El *Ecohydro Logger* desarrollado en esta investigación es, con un costo total de US\$ 100, significativamente más barato que registradores de datos locales. Adicionalmente, la accesibilidad, y naturaleza de código abierto del sistema de adquisición de datos basado en Arduino, muestra un gran potencial para la integración en sociohidrología, lo cual puede empoderar a ciudadanos locales para contribuir a aumentar el conocimiento sobre los recursos hídricos en las comunidades.

Reconocimientos

Esta investigación fue conducida como parte del Proyecto FuturAgua establecido a través del *Forum Belmont* (<http://www.belmontforum.org/funded-projects/enhancing-adaptation-and-resilience-drought-dry-tropical-social-ecological-system>). Agradecemos el apoyo financiero para estos esfuerzos, provisto por el *Canadian Natural Science and Engineering Research Council* (NSERC). Los autores también agradecemos por su colaboración y apoyo a los actores locales (ACT Nicoya, NicoyAgua) y a los dueños de fincas; por su asistencia en el laboratorio y en el campo de Morgan Haines, Cameron Webster y Grethel Rojas Hernández, así como a los colaboradores de FuturAgua. Apreciamos la retroalimentación de tres revisores anónimos.

Recomendaciones para la seguridad hídrica

- Para asegurar la seguridad hídrica necesitamos conocer cuánta agua hay para ser manejada y distribuida entre las diferentes necesidades. También, necesitamos conocer cómo esta disponibilidad del agua difiere entre los años húmedos y los secos para adaptar nuestro uso del agua adecuadamente.
- Para esto requerimos datos hídricos (tales como niveles de ríos y agua subterránea). Las tormentas son rápidas y cortas en Guanacaste, y para capturar estos flujos, necesitamos medir los niveles del agua frecuentemente.
- El registrador de datos de bajo costo puede ayudar a recolectar datos hídricos frecuentes y de forma continua.
- Los datos hídricos pueden ayudar para desarrollar estrategias de adaptación y la distribución del agua.

Referencias

- 1 Montari, A., G. Young, H.H.G. Savenije, D. Hughes, T. Wagener, L.L. Ren, D. Koutsoyiannis, C. Cudennec, E. Toth, S. Grimaldi, G. Blöschl, M. Sivapalan, K. Beven, H. Gupta, M. Hipsey, B. Schaeffli, B. Arheimer, E. Boegh, S.J. Schymanski, G. Di Baldassarre, B. Yu, P. Hubert, Y. Huang, A. Schumann, D.A. Post, V. Srinivasan, C. Harman, S. Thompson, M. Rogger, A. Viglione, H. McMillan, G. Characklis, Z. Pang, and V. Belyaev. 2013. "Panta Rhei-Everything Flows": Change in hydrology and society –The IAHS scientific decade 2013-2022. *Hydrol. Sci. J.* 58(6):1256-1275. Doi:10.1080/02626667.2013.809088.
- 2 Wohl, E., A. Barros, N. Brunsell, N.A. Chappell, M. Coe, T. Giambelluca, S. Goldsmith, R. Harmon, J.M.H. Hendrickx, J. Juvik, J. McDonnell, and F. Ogden. 2012. The hydrology of the humid tropics. *Nat. Clim. Chang.* 2(9):655-662. Doi:10.1038/nclimate1556.
- 3 Hut, R. 2013. New observational tools and datasources for hydrology. PhD dissertation. Technische Universiteit Delft, the Netherlands.
- 4 Wickert, A.D. 2014. The ALog: Inexpensive, open-source, automated data collection in the field. *Bull. Ecol. Soc. Am.* 95(2):166-176. Doi:10.1890/0012-9623-95.2.68

- 5 Hicks, S.D., A.K. Aufdenkampe, D.S. Montgomery, S. Damiano, and H. Brooks. 2015. A new Arduino datalogger board for simple, low cost environmental monitoring and the EnviroDIY web community. Paper presented at 2015 Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, CA. Abstract H23G-1658.
- 6 Islam, A., T. Islam, M.A. Syrus, and N. Ahmed. 2014. Implementation of flash flood monitoring system based on wireless sensor network in Bangladesh. In: 3rd International Conference on Informatics, Electronics & Vision, Dhaka, Bangladesh. 23-24 May 2014.
Doi:10.1109/ICIEV.2014.6850752
- 7 Bitella, G., R. Rossi, R. Bochicchio, M. Perniola, and M. Amato. 2014. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. *Sensors (Basel Switzerland)* 14(10):19639-19659.
Doi: 10.3390/s141019639.
- 8 Lopez, J.C.B., and H.M. Villaruz. 2015. Low-cost weather monitoring system with online logging and data visualization. Paper presented at the 8th IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 2015 conference, Cebu, Philippines.
- 9 Waylen, P.R., M. Quesada, and C. Caviedes. 1996. Temporal and spatial variability of annual precipitation in Costa Rica and the southern oscillation. *Int. J. Climatol.* 16:173-193.
Doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199602)16:2<173::AID-JOC12>3.0.CO;2-R
- 10 Kuzdas, C., A. Wiek, B. Warner, R. Vignola, and R. Morataya. 2014. Sustainability appraisal of water governance regimes: The case of Guanacaste, Costa Rica. *Environ. Manage.* 54(2):205-222.
Doi:10.1007/s00267-014-0292-0.
- 11 Moore, R.D. 2005. Slug injection using salt in solution. *Streamline Watershed Manage. Bull.* 8(2):1-6.
- 12 Kongo, V.M., J.R. Kosgei, G.P.W. Jewitt, and S.A. Lorentz. 2010. Establishment of a catchment monitoring network through a participatory approach in a rural community in South Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14:2507-2525. Doi:10.5194/hess-14-2507-2010
- 13 Sivapalan, M., H.H.G. Savenije, and G. Blöschl. 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol. Processes* 26(8):1270-1276. Doi:10.1002/hyp.8426

Las notas de investigación de FuturAgua sintetizan para la región los resultados científicos del proyecto que busca aumentar la resiliencia a la sequía de las poblaciones de Guanacaste, Costa Rica.

www.futuragua.ca

Editores: Marianela Argüello L. y Grégoire Leclerc

Traducción: Marianela Argüello L.

Diseño: Rocío Jiménez, Oficina de Comunicación, CATIE

