



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura

United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Programa Hidrológico Internacional
International Hydrological Programme

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

1

VOL. 4
MAR. 2012

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe
Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

CONSEJO EDITORIAL / EDITORIAL COUNCIL

- Eric Alfaro - Clima
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
- Patricia Ávila - Ciencias Sociales / Antropología Social
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Walter Baethgen - Agua y Agricultura
International Research Institute
for Climate and Society, USA
- Gino Cassasa - Glaciología
Centro de Estudios Científicos, Chile
- Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos
Universidade de Brasília, Brasil
- José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica
Universidad Simón Bolívar, Venezuela
- Evens Emmanuel - Calidad de Aguas
University of Quisqueya, Haiti
- Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación
National Center for Atmospheric Research, USA
- Alfonso Gutiérrez - Hidrología de Superficie
Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Blanca Jiménez - Aguas Urbanas
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Lilian Laborde - Legislación
Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Michael McClain - Ecohidrología
Florida International University, USA
- Miguel Mariño - Aguas Subterráneas
University of California – Davis, USA
- Víctor Pochat - Gestión Integrada
UNESCO
- Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS
Integrating Watersheds and Coastal
Area Management in SIDS, Saint Lucia

STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF

Editor en Jefe / Editor in Chief

Víctor Pochat
UNESCO

Editora Ejecutiva / Executive Editor

Zelmira May
UNESCO

Coordinador de Edición / Editorial Coordinator

Federico Langguth
UNESCO

Diseño Gráfico / Graphic Design

María Noel Pereyra
UNESCO

Diseño de Portada / Cover Design

Federico Langguth
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

- Valoración del Agua para la Producción
de Arroz en Entre Ríos
Manzán, A. L., Pagliettini, L. y Robles, D.
Valuation of water for rice production in Entre Ríos. 1
- Utilización de información procedente de teledetección
para el análisis de sistemas subterráneos
Gustavo Ferreira, Marta Marizza, Leticia Rodríguez
On the use of remotely sensed information
for the analysis of groundwater systems. 9
- Verificación del principio ergódico para un proceso de dispersión
en flujos.
Alfredo Constain Aragón
Verification of Ergodic Principle
for a Dispersion Process in Flow 19
- Aplicaciones prácticas del principio ergódico a la condición
de "longitud de mezcla" usando trazador: análisis de
dos cauces naturales en Colombia (Río Pance y Río Cali).
Alfredo José Constain Aragón
Practical Applications of Ergodic Principle to
"Mixing Length" Condition Using Tracers: Analysis
of Two Natural Streams in Colombia
(Pance and Cali Rivers)..... 30
- Huella hídrica de América Latina: retos y oportunidades
**Rita Vázquez del Mercado Arribas, Mario Óscar Buenfil
Rodríguez**
Latin America's water footprint:
challenges and opportunities..... 41
- Calidad del Agua en pozos de la Red de Monitoreo
del Acuífero del valle de San Luis Potosí, México
**Yazmin Peña Hernández, Germán Santacruz de León,
Hilario Charcas Salazar**
Water Quality in Wells of the Network of Monitoring
of the Aquifer in the Valley of San Luis Potosí, Mexico 49

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA

Universidad de Cataluña-UPC, Barcelona, España
Technical University of Catalonia-UPC, Barcelona, Spain

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

Programa Global para la Sostenibilidad Hídrica (GLOWS),
Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID)
Global Water for Sustainability Programme (GLOWS)
United States Agency for International Development (USAID)

DAVID ENFIELD

Administración Nacional de Asuntos Oceánicos y Atmosféricos (NOAA), EE.UU
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México
Center of Research and Higher in Studies of Social Anthropology (CIESAS), Mexico

MICHAEL GLANTZ

Universidad de Colorado, EE.UU
University of Colorado, USA

KENRICK LESLIE

Centro para el Cambio Climático de la Comunidad Caribeña, Belice
Caribbean Community Climate Change Center, Belize

ROBERTO PIZARRO

Universidad de Talca, Chile
University of Talca, Chile

CARLOS TUCCI

Universidad Federal de Río Grande Do Sul, Brasil
Federal University of Río Grande Do Sul, Brasil

SUSCRIPCIONES

Si desea recibir la revista Aqua – LAC en forma
periódica en formato digital descargue el formulario
de suscripción de nuestro sitio web:

www.unesco.org/uy/phi/aqualac
y envíelo a
aqualac@unesco.org.uy

SUSCRIPTIONS

If you would like to periodically receive Aqua – LAC
journal in digital format download the suscription
form from our website:

www.unesco.org/uy/phi/aqualac
and send it to
aqualac@unesco.org.uy

EDITORIAL

El año 2012 es un año crucial en las discusiones sobre el futuro del desarrollo sostenible de la humanidad. Sin lugar a dudas, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible mejor conocida como "Río + 20" es un mojón fundamental en el posicionamiento de los países sobre el futuro y sobre como avanzar hacia un mejor futuro para todos los seres humanos y para el planeta.

Veinte años después de la histórica Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, 1992) que presentó el concepto de "desarrollo sostenible", Río +20 es una nueva oportunidad para mirar hacia el mundo que queremos tener en 20 años. Los líderes mundiales, junto con miles de participantes del sector privado, las ONGs y otros grupos, se unen para pensar en acciones locales efectivas para reducir la pobreza, fomentar la equidad social y garantizar la protección del medio ambiente en un planeta cada vez más poblado.

Uno de los principales resultados de la Conferencia de Río +20 es la puesta en marcha del proceso hacia el desarrollo de un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que se basarán en los Objetivos de Desarrollo del Milenio y que convergen en la agenda de desarrollo post-2015.

Son varias las áreas desde las cuales contribuir con este ambicioso fin. Desde la UNESCO, continuaremos apoyando y promoviendo las ciencias del agua, entendiendo que este recurso es un elemento transversal al desarrollo sostenible, a la equidad y a la disminución de la pobreza. El fomento de la ciencia para el desarrollo sostenible a través del fortalecimiento de la base científica, la contribución a una mejor comprensión de la ciencia, y la construcción de capacidades científicas en torno al agua, desde una mirada holística, es el aporte que podemos realizar a través de nuestro trabajo diario.

En este sentido, Aqua-LAC busca aportar a la reflexión global a través de la generación, difusión e intercambio de conocimiento, para una comprensión sistémica del mundo y sus recursos. Como comunidad científica debemos plantearnos este desafío, y desde Aqua-LAC intentar ser un medio para alcanzar este fin.

Jorge Grandi
Director
Oficina Regional de Ciencia
para América Latina y el Caribe

EDITORIAL

2012 is a key year in the discussions regarding the future of mankind sustainable development. Undoubtedly, the United Nations Conference on Sustainable Development, also known as "Rio + 20" is a fundamental milestone in the countries' position concerning the future and how to move towards a better future for all human beings and for the planet.

Twenty years after the renowned Earth Summit (Rio de Janeiro, 1992), which introduced the concept of "sustainable development", Rio +20 is a new opportunity to look at the world we would like to have in 20 years' time. World leaders, along with thousands of participants coming from the private sector, NGOs and other groups get together to think about effective local actions in order to reduce poverty, promote social equity and ensure environmental protection in an increasingly crowded planet.

One of the main outcomes of the Rio +20 Conference is the launching of the process towards the development of a set of Sustainable Development Goals (SDG), which will be based on the Millennium Development Goals and that converge on the 2015 post-development agenda.

There are several areas from which to contribute to this ambitious goal. From UNESCO, we will continue supporting and promoting the water sciences, on the understanding that this resource is a crosscutting component for sustainable development, equity and poverty reduction. The promotion of science for a sustainable development by strengthening the scientific basis; the contribution to a better understanding of science; and the support to scientific capacity-building on water from a holistic perspective, are the contributions we can make through our daily work.

In this regard, Aqua-LAC seeks to add to the global debate through the generation, dissemination and exchange of knowledge for a systemic understanding of the world and its resources. As part of the scientific community we should consider this challenge, and from Aqua-LAC to try is a way to achieve this end.

Jorge Grandi
Director
Regional Bureau for Science
for Latin America and the Caribbean

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación

La Revista Aqua-LAC será publicada cada seis meses o dos veces al año.

Contenido

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinaria que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social. El contenido de la publicación buscará abarcar las necesidades de la comunidad científica, gestores de los recursos hídricos, tomadores de decisiones y el público en general.

Idioma

La publicación Aqua-LAC aceptará manuscritos en inglés y español, y publicará el resumen en el idioma original del texto y un resumen en el otro idioma oficial de la revista.

Aceptación de los manuscritos

Los manuscritos sometidos para publicación deberán ser originales, no habiéndose sometido con anterioridad para su publicación en otros medios, y serán sometidos a un proceso de revisión y dictamen previos a su aceptación. Artículos invitados, o artículos en ediciones temáticas especiales, no necesariamente serán sometidos a revisión.

El Editor en Jefe, en consulta con el Consejo Directivo, se reserva el derecho de rechazar un manuscrito si se considera que su contenido en fondo y/o forma no se ajusta a la línea editorial de la revista Aqua-LAC.

Proceso de revisión

Todos los manuscritos sometidos a publicación serán revisados por al menos dos revisores calificados, no necesariamente miembros del Comité Editorial. Un manuscrito puede ser aceptado, aceptado con condiciones, o rechazado con la debida justificación en todos los casos. En el caso de que haya comentarios, el manuscrito será devuelto al (a los) autor(es) para que respondan a los mismos. El (Los) autor(es) tendrán 60 días para devolver el manuscrito modificado al Editor en Jefe, claramente indicando los cambios realizados o enviando una declaración escrita solidamente fundamentada del motivo por el cual no han acogido los comentarios de los revisores.

Derechos de reproducción (Copyrights)

Los autores de artículos aceptados para ser publicados, aceptarán de manera automática que los derechos de autor se transferirán a la revista.

Responsabilidad

Debido a la naturaleza intergubernamental de la UNESCO, la Organización se reserva los derechos de notificar en todas las publicaciones de Aqua-LAC que *“Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización”*.

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication

The journal Aqua-LAC will be published every six months or twice a year.

Contents

The journal Aqua-LAC contains scientific, policy-related, legislative, educational, social, and communication articles and revisions related to water sciences and water resources topics. The content of the journal is aimed to meet the requirement of the scientific community, water resources managers, decision-makers, and the public in general.

Languages

The journal Aqua-LAC accepts manuscripts in English or Spanish and publishes abstracts in both languages.

Acceptance of manuscripts

Manuscripts submitted for publication must be originals that have not been submitted for possible publication elsewhere. Submitted manuscripts will be undergoing a review process. Invited articles or articles in special topical editions, will not necessarily be submitted to review.

The Editor in Chief, in consultation with the Board of Directors, reserves the right to reject a manuscript if its contents is deemed substantially or formally inconsistent with the editorial line of AQUA-LAC magazine

Review process

All manuscripts submitted for publication will be reviewed by at least two qualified reviewers, not necessarily members of the Editorial Committee. A manuscript can be accepted with or without comments or it can be rejected with due justification. In the first case, the manuscript will be returned to the author(s) for him/her/them to address the comments. The author(s) will have 60 days to return the modified manuscript to the Editor in Chief, clearly indicating the changes made or providing a written statement with solid fundamentals for not addressing comments by the reviewers.

Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree the author rights to be transferred to the Journal. The author(s) are expected to sign a copyright form available in the Aqua-LAC webpage.

Disclaimer

Due to the intergovernmental nature of UNESCO, the organization reserves the right to state in all Aqua-LAC publications that *“The designations employed and the presentation of material throughout the journal do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The authors are responsible for the facts and opinions expressed therein, which are not necessarily those of UNESCO and do not commit the Organization”*.

VALORACIÓN DEL AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE ARROZ EN ENTRE RÍOS VALUATION OF WATER FOR RICE PRODUCTION IN ENTRE RÍOS

Manzán, A. L.¹, Pagliettini, L.² y Robles, D.³

Resumen

El agua es un recurso natural que debe ser valorado no sólo tomando en cuenta los costos asociados a su disponibilidad, sino también el valor que como insumo tiene para la sociedad. El objetivo de este trabajo es avanzar en la identificación de las categorías de análisis que permitan obtener una aproximación al valor privado del agua utilizada para producir arroz, comparando su valor en el mercado regional y el que surge del marco institucional vigente en la provincia de Entre Ríos. El análisis de los componentes que integran la cuota de arrendamiento que pagan los productores de arroz por el uso del agua, permite distinguir un monto de 8 qq/ha en concepto de canon de agua y un costo de disponibilidad de 4.51 qq/ha, resultando un excedente de 3.49 qq/ha. El monto previsto según la ley, considera la depreciación y el costo de oportunidad del capital invertido, sin asignarle valor económico al recurso propiamente dicho.

Palabras clave: agua, canon de riego, arroz.

Abstract

Water is a natural resource that must be valued not just by its costs related with its availability, also be its value as an input for society. The objective of this work is to improve at categories of analysis identification that would allow an approach to the water private value used in Rice production, comparing its value at the regional market and that one that comes from Entre Ríos Province's institutional model in force. Analysis of the components that conform the renting quota paid by the Rice producers for the use of water, allow to show that a 8qq/ha amount as water-cannon and a availability cost of 4.51 qq/ha, resulting in a 3.49 qq/ha surplus. The amount by law considers the depreciation and opportunity costs of capital investment without giving economic value to the resource per se.

Keywords: water, water-cannon, rice

INTRODUCCION

El agua es un recurso natural que debe ser valorado no sólo tomando en cuenta los costos asociados a su disponibilidad, sino también el valor que como insumo tiene para la sociedad. Los principales organismos internacionales se refieren al agua como un bien económico y social, y como tal debe ser administrado, asumiendo su carácter de bien escaso y el derecho a su acceso de toda la sociedad (Banco Interamericano de Desarrollo, 1992; ONU, 2002). Esto implica la necesidad de su valorización entre usos alternativos para la asignación racional del agua, así como la consideración de las externalidades económicas y medioambientales que su uso genera.

Según los postulados de la teoría neoclásica el valor de un bien o recurso esta dado por la disposición a pagar por él Este enfoque adquiere relevancia en di-

versos trabajos donde los beneficios del uso del agua son evaluados en relación a la productividad de los cultivos con que se encuentran asociados (Molden et al, 1998) a escala local, o a nivel agregado regional o nacional. Sin embargo estos enfoques no incorporan las interacciones entre los diferentes usos y la multifuncionalidad del agua, lo que limita la valoración de la misma (Barbier et al, 1997)

Cuando el objetivo de valorizar el recurso este asociado a una política de precios es importante considerar los costos de disponibilidad del agua y las alternativas de uso, sin embargo cuando su valorización esté relacionada con decisiones de inversión, distribución o gestión del recurso se deben considerar los costos sociales que su uso genera. Aspectos como salinización del suelo, pérdida de fertilidad, disminución de flujos hídricos y contaminación, pérdida de biodiversidad, desplazamiento de actores por efecto de grandes proyectos, suelen ser muy impor-

¹ Facultad de Agronomía de la UBA; www.agro.uba.ar, Av. San Martín 4453 (C1417DSE), tel: 011-4524-8000 (int. 8157/8158). Ayudante Segunda de la Cátedra de Economía Agraria, manzan@agro.uba.ar

² Facultad de Agronomía de la UBA; www.agro.uba.ar, Av. San Martín 4453 (C1417DSE), tel: 011-4524-8000 (int. 8157/8158) Profesora titular de la Cátedra de Economía Agraria paglietti@agro.uba.ar

³ Facultad de Agronomía de la UBA; www.agro.uba.ar, Av. San Martín 4453 (C1417DSE), tel: 011-4524-8000 (int. 8157/8158) Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Economía Agraria, drobles@agro.uba.ar

tantes, cuando se destina el agua para uso agrícola (Postel, et al, 1999).

La expansión del cultivo de arroz en el centro este de Corrientes y en el nordeste de Entre Ríos, durante la década del 90, en base a modelos tecnológicos intensivos en capital que utilizan agua de represas, y operan grandes superficies, intensificó la demanda del recurso hídrico., generando conflictos entre los diferentes agentes sociales que interactúan en los sistemas de cuencas.

Los lineamientos de política hídrica, consensuados en el seno del Consejo Hídrico Federal, señalan que "la formulación de una política hídrica, la evaluación del recurso, la planificación, la administración, la asignación de derechos de uso y vertido, la asignación de recursos económicos, el dictado de normativas y muy especialmente la preservación y el control son responsabilidades indelegables del Estado". En este sentido se deberán diseñar instrumentos económicos que orienten la asignación del agua buscando alcanzar el equilibrio económico, social y ambiental, democratizando todas las instancias de la gestión pública, para que los beneficios alcancen a los múltiples usuarios del recurso.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En Corrientes el sistema de riego predominante se basa en el aprovechamiento de agua superficial, favorecido por las características de su sistema hídrico, lo que junto a las condiciones edáficas requeridas, permitió la dispersión del cultivo en los diversos ambientes naturales que conforman el territorio provincial. Mientras que el sistema de riego predominante en Entre Ríos se orienta al aprovechamiento de agua subterránea. Esta fuente, limita la expansión del área arroceras pues su disponibilidad compite con otros usos, ya sea agropecuarios, industriales o para consumo humano.

La mayor competitividad que adquiere la actividad arroceras, en la década del 90, en ambas provincias, se manifiesta en: la expansión de la superficie sembrada, la que muestra un avance en la frontera agrícola sobre campos de cría de ganado; la presencia de unidades productivas cada vez mayores; la intensificación de los sistemas agrícola pecuarios; la tendencia a la "sedentarización" de una actividad tradicionalmente itinerante, como consecuencia del incremento de la superficie regada con agua acumulada en represas construidas por el sector privado. (Pagliettini, L.; Carballo,C; 2001).

La presencia en Entre Ríos de grandes cuencas hidrográficas y una vasta red de arroyos y ríos le confieren a esta provincia un importante potencial de crecimiento en el aprovechamiento de aguas superficiales, como fuente de agua para riego.

Federal, Federación y Feliciano, departamentos situados al nordeste, con el 50 % de su superficie cubierta por monte, buena aptitud de suelos, topografía

adecuada y baja disponibilidad de agua en sus acuíferos, se convierte en una zona estratégica para la expansión agrícola basada en esta técnica de riego.

Las presas ubicadas en bajos, en nacientes de arroyos o interceptando cursos de agua permanentes o transitorios, aumentan la eficiencia del sistema de riego reduciendo los costos medios de producción, con altos requerimientos de capital inicial y una mayor complejidad operativa.

Los nuevos emprendimientos exigen la intervención de los organismos públicos a los efectos de asegurar la articulación de la gestión hídrica con la gestión ambiental y con la gestión territorial. Así lo establecen los Principios rectores de la Política Hídrica de la República Argentina, donde se señala: en el primer caso, la necesidad de otorgarle a los recursos hídricos un enfoque integrador y global, coherente con la política de protección ambiental, mediante la actualización y armonización de las normativas y una sólida coordinación intersectorial; en el segundo, señalando la necesidad de que el sector hídrico participe en la gestión territorial de las cuencas hídricas, interviniendo en las decisiones sobre el uso del territorio e imponiendo medidas mitigatorias y restricciones al uso del suelo, cuando pudiera conducir a impactos inaceptables en los recursos hídricos, especialmente respecto a la calidad del agua, función hidráulica de sus cauces y los ecosistemas acuáticos. (Principios rectores de la Política hídrica de la R.A., 2003)

Dentro de la normativa vigente, la Ley de Nacional de Bosques, constituye un aporte al ordenamiento del territorio, al detener la tala de bosques hasta que las provincias fijen los valores de conservación de sus bosques nativos.

En el caso de las provincias del Litoral con mayor expansión de la actividad arroceras, en la medida que se identifiquen áreas con diferente vulnerabilidad para la explotación forestal, la construcción de represas se ubicará en zonas aptas con menor riesgo de daño ambiental.

En nuestro país existen normas sobre aguas tanto en la legislación nacional, como en la legislación provincial. Según señala esta normativa "estas integran el dominio público, cuyo titular es la ciudadanía, que no la administra en forma directa sino a través de sus autoridades" (CN, art 22) (Del Castillo, 2007).

La legislación provincial determina en todos los casos el pago de un canon por el derecho de uso del agua pública, siendo sus valores diferentes según el criterio utilizado para su determinación.

Es posible reconocer distintos criterios para fijar las tarifas a pagar por el uso del agua. Un estudio realizado en 1996, en Brasil, señala cuatro criterios de valoración: financiero, económico, distribución de la renta e igualdad social, según tenga en cuenta el costo del servicio (inversiones, mantenimiento), el costo de oportunidad o las externalidades producidas (Lanna y otros, 1996).

El mercado de agua vinculado a la producción de arroz.

La estratégica ubicación de Entre Ríos y Corrientes en el área del Mercosur y la importancia de sus cuencas hidrográficas, han dinamizado la actividad económica vinculada a la producción de arroz con riego, concentrando estas provincias el 90% de la producción nacional. El desplazamiento del núcleo dinámico de la actividad a la zona centro este en Corrientes se asienta en el nuevo modelo basado en la captación de agua superficial a través de represas de tierra; en esta zona la calidad del suelo y su adaptación a nuevas variedades, permitió en una década la incorporación de 35.197 ha, el 45% del total cultivado en la Provincia. Por su parte, en Entre Ríos, la creciente presión que esta actividad económica productiva, ejerce sobre los acuíferos subterráneos y su competencia con otros usos, limitan la expansión de la zona centro, principal área productora. La ampliación de la superficie hacia el norte-que abarca los departamentos de Federal, Federación y Feliciano-se logra aprovechando el agua superficial, almacenada en represas, lo que permitió la incorporación de 22.235 ha, el 17% de la superficie sembrada a nivel provincial.(Pagliettini L.; CuriC. (2001) Representando en la campaña 2007/08 la superficie sembrada en estos tres departamentos el 32,2% de la superficie total sembrada en la provincia. En esta campaña las fuentes de agua para regar el cultivo de arroz se distribuyen del siguiente modo: 55% de los lotes son regados con agua proveniente de pozos profundos, 23% son regados por agua acumulada en represas, 12% del riego es a través de tomas en ríos o arroyos, 8 % combina pozo y río y 2% combina pozo y represa (Carñel et. al, 2007).En los últimos años el Estado provincial ha realizado importantes inversiones que permitieron electrificar distintas zonas rurales Dicha iniciativa redujo los costos del sistema de riego por pozo profundo, lo que permitió ampliar la superficie cultivada que utiliza agua subterránea.

Esta ampliación de la actividad arrocerá, incrementó la demanda de agua en la región y promovió la formación de un "mercado de agua" entre aquellos que poseen emprendimientos que acumulan agua en represas de diferente magnitud, y los productores que cultivan arroz, en explotaciones con distinta escala de superficie.

El objetivo de este trabajo es avanzar en la identificación de las categorías de análisis que permitan obtener una aproximación al valor privado del agua utilizada para producir arroz, comparando su valor en el mercado regional y el que surge del marco institucional vigente en la provincia de Entre Ríos.

METODOLOGÍA

Diferentes estudios determinan el valor del agua, utilizando métodos indirectos de valoración. Para determinarlos se utilizan, en algunos casos, técnicas de

presupuestos para explotaciones agrícolas o "excedente residual", que permite estimar el valor medio que los regantes estarían dispuestos a pagar por el uso del agua, en el corto o en el largo plazo y en sus usos competitivos (Colby-Saliba y Bush, 1987 ; Naeser y Benett, 1998; Pagliettini, Gil, 2008). Otros métodos se basan en derivar la función de demanda del agua a partir de la función de producción del cultivo (Ruttan, 1965 ; Gibbons, 1986). Sus dificultades se centran en establecer las relaciones de producción del cultivo, con respecto al agregado de agua. Sin embargo, estas relaciones pueden ser estimadas utilizando programación lineal, para uno o varios períodos. Modelos para un período, fueron desarrollados para calcular la función de demanda derivada del agua (Flinn, 1971) (Hartman y Whittlesey, 1961; Moore and Hedges, 1963; Yaron, 1967; Kulshreshtha y Tewari, 1991; Shumway, 1973).

En ésta propuesta la valoración del agua surge del registro de las transacciones en el mercado de este insumo, creado a partir de la oferta y la demanda del sector privado arrocerá (Turner et. al, 2004). Donde la demanda expresa la disposición a pagar que es función de la productividad del cultivo y la oferta esta condicionada a la proximidad a los cursos de agua o al almacenamiento de agua en represas.

Para ello, se determinan a partir del canon pagado en la zona, los componentes del valor de mercado implícitos en los montos pagados por el usuario, a través de entrevistas en profundidad realizadas a productores arroceros e informantes calificados de la zona bajo estudio. De los tres departamentos del norte de Entre Ríos, que han liderado la expansión del cultivo de arroz, en base al uso de tecnologías que acumulan agua en represas, se selecciona para el estudio al departamento de Feliciano, ya que es el único donde esta técnica es excluyente.

Para delimitar la superficie de las explotaciones y la ubicación de las represas sobre cursos de agua permanentes o transitorios, se utiliza la cartografía y mapas de cursos de agua de la zona bajo estudio del IGM (Instituto Geográfico Militar), imágenes del INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Brasileiro) e información catastral a partir de Mapas Rurales.

Los criterios utilizados para determinar el valor de mercado del agua se basan en la estimación del valor del recurso a través de la consideración de tres elementos que lo componen:

El costo de disponibilidad (extracción/almacenamiento + transporte),

Un excedente que varía según sean sus diferentes usos alternativos, asociados al desarrollo de determinadas actividades.

El tercer elemento es la consideración de las externalidades que produce la utilización del recurso en una determinada actividad al resto de los usuarios, lo que permite definir el valor económico del agua.

El primer término, “costo de disponibilidad” considera la infraestructura y los sistemas de gestión para garantizar que habrá una determinada cantidad de agua disponible en el tiempo. En el riego por represas incluye la inversión (movimiento de tierra, canales colectores y canal principal) ya que los canales terciarios generalmente son realizados por el arrendatario.

Para su determinación se utilizó el análisis de inversiones partiendo de la expresión (Caballer, Guadalajara, 1998)

$$VAN = -A / (1+K)^1 - B / (1+K)^2 + E \text{ Bni} / (1+K)^n$$

Donde:

A= Inversión hecha en la represa el año 1

B= Inversión hecha en la represa el año 2

Bni = Beneficio Neto incremental en los 30 años que dura la inversión

K= costo de oportunidad del capital

Bni = Bi – Ci

Ci = Costo de Mantenimiento

Pi = Precio del agua en el año i, en u\$/ m³

Xi = Cantidad de m³ de agua vendida en el año i

El segundo término “el excedente” tiene en cuenta los diversos usos a los que se puede destinar el recurso y las utilidades que derivan de los mismos, o sea su costo de oportunidad.

Desde el punto de vista privado el costo de disponibilidad más el costo de oportunidad, conformarían el valor de mercado del agua. Este estudio se orienta a determinar los dos primeros elementos, a través del canon de riego pagado en la zona.

Se analiza, además, el marco institucional que rodea a la gestión del agua en la provincia de Entre Ríos, a partir de la intervención del Consejo Regulador de las fuentes de agua y su vinculación con instituciones nacionales, provinciales y municipales, en base a información secundaria y a entrevistas mantenidas con técnicos y funcionarios de la Institución.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

La producción de arroz en Argentina, así como la competitividad a escala regional e internacional, están directamente relacionadas con la disponibilidad de agua para regar el cultivo. El agua es un insumo en la función de producción del productor arrocero. El sistema de mercado que rige la asignación de los recursos mide el valor que el productor asigna al agua de riego a través de “la disposición marginal a pagar por ella”, en condiciones de libre competencia. Es importante destacar que este enfoque no considera las imperfecciones de mercado, que son los

costos que debe pagar la sociedad por su uso, no internalizadas en su precio.

El canon de arrendamiento que paga el productor por el uso de la tierra y el agua para producir arroz incluye la “renta capitalista” que corresponde al pago por el derecho de usar en forma productiva un medio de producción no producido, el interés y la depreciación del capital invertido y un excedente adicional que remunera el uso del recurso agua (Pagliettini, 2009). Este excedente más el costo de disponibilidad constituyen el valor privado del agua.

Esto nos permite obtener un valor de mercado del agua para producir arroz en el Litoral argentino, que es la base orientativa para construir un valor económico y social, necesario para establecer una distribución y asignación equitativa de un recurso finito.

Determinación del valor privado del agua

El Departamento de Feliciano es analizado utilizando imágenes satelitales, mapas de catastro y ríos, a partir de los cuales se delimitaron las distintas explotaciones, el área que ocupan, la superficie destinada al cultivo de arroz y aquella ocupada por la represa. Además de determinar el carácter transitorio o permanente del curso interceptado por la obra de riego. **Tabla 1**

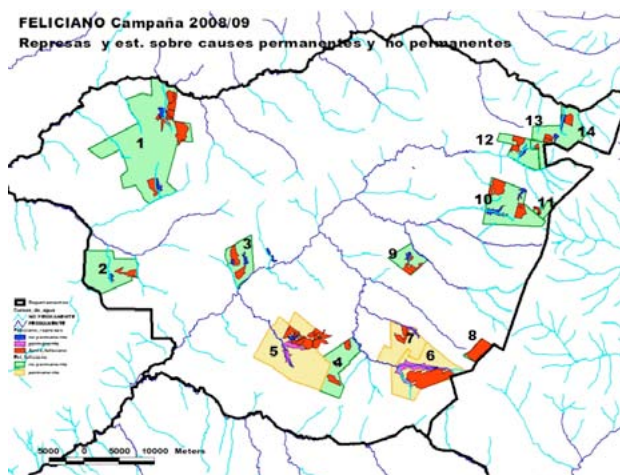


Figura 1. Elaboración Propia en base a imágenes del INPE (Brasilero), Cartografía y mapas de ríos del Instituto Nacional de Pesquisa IGME información catastral de Mapa Rural.

Cuadro 1: Entre Ríos. Feliciano Superficie total de las explotaciones agropecuarias, superficie sembrada con arroz, superficie que ocupa la represa y origen del curso de agua.

| Número | Sup. Total (has) | Sup. Represas (has) | Sup. Arroz (has) | Origen del curso de Agua |
|--------|------------------|---------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | 11980 | 190 | 1070 | no permanentes |
| 2 | 3460 | 47 | 205 | no permanentes |
| 3 | 1935 | 100 | 400 | no permanentes |
| 4 | 2264 | 27 | 230 | no permanentes |
| 5 | 7060 | 370 | 930 | permanentes |
| 6 | 4634 | 545 | 1200 | permanentes |
| 7 | 2414 | 74 | 255 | permanentes |
| 8 | 1290 | 56 | 237 | no permanentes |
| 9 | 3820 | 270 | 620 | no permanentes |
| 10 | 1654 | 85 | 250 | no permanentes |
| 11 | 2680 | 150 | 270 | no permanentes |

Fuente: Elaboración propia

Predominan en la zona, unidades productivas de mayor escala que en el área donde se utiliza riego subterráneo, sistema que caracteriza la producción de arroz en la provincia. Prevalen las obras construidas sobre cursos de agua no permanente y la superficie sembrada en el rango de 200 a 399 ha

Tabla 2: Entre Ríos. Feliciano. Cantidad de explotaciones agropecuarias por escala de superficie sembrada con arroz.

| Sup. con arroz (ha) | Cantidad de EAP | % |
|---------------------|-----------------|------|
| 0-299 | 6 | 54.5 |
| 300-500 | 1 | 9.1 |
| 500-700 | 1 | 9.1 |
| Más de 700 | 3 | 27.3 |
| Total | 11 | 100 |

Fuente: Elaboración propia

El canon pagado por el uso del agua por los productores que cultivan arroz, en el área del noreste de la provincia, a los propietarios de las represas, registra un valor promedio de 8 qq ha⁻¹, según los resultados de las entrevistas realizadas.

Para calcular el costo de disponibilidad se utiliza un análisis de inversiones. Esta metodología nos permite obtener el precio que se debería pagar por la

venta de agua para recuperar la inversión y tener una rentabilidad del 6%.

Suponiendo conocidos todos los términos de la expresión podemos calcular el precio del agua de riego

$$VAN = -A / (1+k)^1 - B (1+K)^2 + ((P_i * x_i) - C_i) * ((1+k)^n - 1) / (K * (1+K)^n)$$

Siendo A= 152.686,60 u\$s

B= 67.413,60 u\$s

K= 6%

Xi = 204 ha * 11000 m³ ha⁻¹

Ci = 4050 u\$s

$((1+k)^n - 1) / (K * (1+K)^n) = 11.93$

PI = 0.00942658 u\$s m⁻³

Pi = 103, 692402 u\$s/ ha

PI = 4,51 qq/ ha

Canon pagado en la zona por el agua – costo de disponibilidad = excedente pagado por el uso del agua para el cultivo de arroz en la zona noreste de la provincia de Entre Ríos;

8 qq/ ha – 4,51 qq/ha = 3,49 qq/ha

Costo de disponibilidad + excedente = 4,51 qq/ha + 3,49 qq/ha = valor privado del agua.

Marco institucional para la gestión del agua en Entre Ríos

Frente a la creciente demanda del recurso hídrico con fines económicos-productivos, y los conflictos de intereses suscitados, el gobierno de Entre Ríos, atendiendo a las necesidades de planificación, ha sancionado un Código de Aguas establecido en la Ley N° 9.172 de 1998 y su Decreto Reglamentario N° 7.547 de 1999, para regular el uso y aprovechamiento del recurso natural constituido por aguas subterráneas y superficiales en todo el territorio de la provincia.

Entre su artículo 15 indica que “.....el derecho al uso especial (con fines agropecuarios) de las aguas de dominio público y la construcción de obras hidráulicas o saneamiento será otorgado por el Poder Ejecutivo mediante permiso o concesión a la persona interesada..... “El otorgamiento del permiso o concesión podrá fijar el pago de un canon, cuando los permisionarios o concesionarios hagan uso del agua mediante instalaciones de un servicio aportado por entes públicos o privados. El importe, tipo y modalidad será determinado por la autoridad de aplicación proporcionalmente a cada usuario, con el fin de cubrir los siguientes aspectos: amortización de las inversiones fijas realizadas para el uso del agua; mantenimiento y conservación de equipos y obras; gastos directos del servicio; y rentabilidad razonable”. (Ley 9172, Cap.V).

Dos aspectos es importante destacar en esta normativa que reglamenta los usos especiales, en el que se incluye el uso agropecuario, primero se prevé el pago de un canon de agua sólo cuando el usuario de agua reciba un servicio que asegure su disponibilidad y segundo no se considera el valor del recurso “propiamente dicho” es decir su valor económico.

Esta omisión presente en la mayoría de los códigos de agua es destacada por algunos autores “Su valor y el de sus servicios ambientales relacionados no se comprende bien, y rara vez se incluye explícitamente en las compensaciones y en la toma de decisiones” (Gerbergkamp y Sadoff, 2008).

Por otra parte los lineamientos de política consensuados por las provincias y la Nación en el seno del Consejo Hídrico federal señalan en referencia al pago por el uso del agua que “Para aquellos usos con probada rentabilidad, corresponde abonar un cargo por el derecho al uso diferenciado de un bien público” (PRPHA, 2003).

Entre sus considerados mas importantes además, figura la creación de un “Catastro de Fuentes de Agua Superficial y Subterránea”, el otorgamiento de permisos o concesiones para el aprovechamiento de las aguas públicas, la creación de un “Consejo Regulador del uso de Fuentes de Agua” (CORUFA), integrado por representantes de organismos públicos y asociaciones de productores, quien como autoridad de aplicación interviene en el otorgamiento de permisos, resolución de conflictos y define el canon a pagar.

El estado provincial a sancionado varias leyes y decretos en materia hídrica (Ley de Aguas Termales, Ley de Línea de Ribera, Ley de Comites de Cuenca y Consorcios de Aguas, etc), pero muchas de ellas aun no han sido reglamentadas o lo estan de manera parcial, y no existen mecanismos de control y supervisión que aseguren el cumplimiento de las normas vigentes. Esta situación unida a la escasa coordinación entre organismos públicos y privados responsables de la política hídrica provincial, debilita el marco institucional para una

eficiente administración del uso del recurso agua.

CONCLUSIÓN

El agua se ha transformado en un recurso estratégico para el desarrollo de muchas actividades productivas. En el caso del cultivo de arroz, la disminución de los costos del sistema de riego, basada en un modelo de captación de agua superficial a través de represas de tierra, definieron en las dos últimas décadas la competitividad del cultivo a escala regional.

La competencia por el uso del agua, que la mayor actividad económica genera, hace necesaria una planificación estatal para el uso y aprovechamiento del agua.

En el marco de las reglamentaciones dictadas por la provincia, se prevé el pago de un canon de riego por el pago del servicio que otorgue un ente público o privado, para asegurar la disponibilidad del recurso. El monto previsto según la ley, considera la depreciación y el costo de oportunidad del capital invertido, sin asignarle valor económico al recurso propiamente dicho.

Sin embargo, el valor del canon, que surge a escala regional, de la interacción de la oferta y la demanda de agua para regar el cultivo de arroz, incluye la remuneración del capital invertido que asegura su disponibilidad y un excedente que remunera el uso del factor.

El análisis de los componentes que integran la cuota de arrendamiento que pagan los productores de arroz por el uso del agua, permite distinguir un monto de 8 qq/ha en concepto de canon de agua y un costo de disponibilidad de 4.51 qq/ha, resultando un excedente de 3.49 qq/ha. Dichos excedentes son captados por los propietarios de tierras que han construido represas interceptando los cursos de agua transitorios o permanentes.

El débil marco institucional que sustenta la gestión del agua en la Argentina dificulta el diseño de instrumentos económicos que permitan al Estado provincial, quien detenta el “dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio”, captar los excedentes y administrarlos en beneficio de toda la sociedad. Esto le permitiría superar las limitaciones técnicas y gerenciales, financiando estudios hidrológicos y de información agro climática, como también inversiones que permitan una distribución mas equitativa del recurso

BIBLIOGRAFIA

Banco Interamericano de Desarrollo, 1992. Agenda 21 y América Latina. Washington D.C. 331 p.

Barbier, E.B.; Mike, A.; Duncan, K. (1997). “Economic valuation of wetlands: a guide for policy makers and planners.” Ramsar Convension Bureau, Gland, Switzerland. Disponible on line en <http://www.ramsar.org/>

- Caballer, V., Guadalajara, N. 1998, Valoración económica del agua de riego Ed. Mundi Prensa Madrid, 193 p.
- Carñel, G. 2007. Relevamiento arrocero en la Provincia de Entre Ríos mediante teledetección y SIG. Arrocero FCA de la UNER y Fundación Proarroz. XIX Jornada Técnica Nacional del cultivo de Arroz, Concordia 29 de agosto de 2008, Entre Ríos. 9-20 p.
- Colby-Saliba, B.; Bush, D. (1987). "Water markets in theory and practice: Market transfers, water values, and Public Policy. Studies in water policy and management. Nº12, Westview Press, Boulder, Colorado.
- Del Castillo, L. (2007) "La gestión del agua en la Argentina". Ed. Ciudad Argentina Buenos Aires. Argentina. 425p.
- Flinn, J.C. (1971). "Estimating the demand for water in commercial agriculture". Canadian Journal of Agricultural Economics. 13(3):128-143. Canadá.
- Gerberkamp H; Sadoff C. (2008). "El agua en una economía sostenible" en "La situación del mundo. Innovaciones para una economía sostenible" The Worldwatch Institute. Cap. 8 (207-223) Ed. Icaria.
- Gibbons, D.C. (1986). "The economic value of water" En "Resources for the future" p. 116. Washington, D.C.
- Hartman, L.M.; Whittlesey, N. (1961). "Marginal values of irrigation water: a linear programming analysis of farm adjustment to changes in water supply." Colorado State University Experimental Station, Technical Bulletin Nº 70, p. 28. Boulder. Colorado.
- Kulshreshtha, S., Tewari, D. 1991. Value of water irrigated crop production using derived demand functions: a case study of south Saskatchewan river irrigation district, Water resources Bulletin. 27(2): 227-236. American Water Resources Association.
- Lanna, A.E. y Santos Pereira, J. (1996) Panorama da cobrança pelo uso da água no Brasil. Instituto de Pesquisas Hidráulicas Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre
- Molden, D. Sakthivadivel, R. Christopher, JP. Charlotte de Fraiture, Wim HK. 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. IWMI Research report, no. 20, International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
- Moore, C.; Hedges, T. (1963). "Economics of On-Farm water availability and cost and related farm adjustments" Giannini Report. California Agricultural Experimental Station. Berkeley. California.
- Naeser, R. Bennet, L. 1998 The cost of noncompliance: The economic value of water in Middle Arkansas River Valley. Natural Resources Journal 38:445-463. University of New Mexico School of Law. Albuquerque.
- ONU 2002 Cumbre Mundial sobre desarrollo sostenible 26 de agosto – 4 de septiembre de 2002. Johannesburgo, Sudáfrica.
- Pagliettini, L. Carballo, C. 2001. El Complejo Agroindustrial arrocero argentino en el MERCOSUR". Ed. Orientación Grafica Editora.
- Pagliettini, L.; Curi, C. (2001). "Tecnología en arroz. El riego con agua de represa Capítulo 6 en "El complejo agroindustrial arrocero argentino en el MERCOSUR". Orientación Gráfica Editorial Buenos Aires. 236 pp
- Pagliettini, L. Gil, G. 2008 El valor del agua en el proceso productivo. Análisis de la Cuenca del Río Miriñay, Revista brasilera de recursos hídricos, 13(3): 165-175.
- Postel, S. 1999. Pillar of sand: can the irrigation miracle last? Washington: The Worldwatch Institute ISBN: 0-393-31937-7. 313pp.
- Ruttan, V. (1965). "The economic demand for Irrigated Acreage: New methodology and some preliminary projection 1954-1980" The Johns Hopkins University Press, Resources for the future, p. 139. Inc., Baltimore, Maryland.
- Shumway, C. (1973). "Derived demand for irrigation water: The California Aqueduct" Southern Journal of Agricultural Economics 5(1):195-200.
- Turner, K.; Georgiou, S.; Clark, R.; Brower, R.; Burice, J. (2004). "Economic valuation of water resources in agricultural". FAO Water Reports 27. FAO. Rome (Italy), Land and water development div., p.187
- Yaron, D. (1967) "Empirical Analysis of the demand of water by Israeli Agriculture" Journal of Farm Economics 4(4): 461-473. American Farm Economic Association, Menasha, Wis.,

Referencias en páginas de Internet

PROARROZ. "Fundación Proarroz" disponible en www.proarroz.com.ar

Universidad Nacional de Entre Ríos. Facultad de Agronomía. Arroz. www.fca.uner.edu.ar/arroz/

Fuentes oficiales

CNA (2002) Censo Nacional Agropecuario 2002. INDEC. disponible en <http://www.indec.gov.ar/>

SIIA- Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. www.sii.gov.ar

ICAA - Instituto Correntino del Agua y el Ambiente. www.icaa.gov.ar

IGN- Instituto Geográfico Nacional. www.ign.gov.ar

INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria www.inta.gov.ar

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Brasileiro Espaciais. www.inpe.br

República Argentina (1994) Constitución Nacional de la República Argentina.

Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina (2003). Autor: Consejo Hídrico Federal. Documento de trabajo, última revisión Agosto de 2003, manuscrito no publicado. Documento de distribución limitada.

UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN PROCEDENTE DE TELEDETECCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS SUBTERRÁNEOS

ON THE USE OF REMOTELY SENSED INFORMATION FOR THE ANALYSIS OF GROUNDWATER SYSTEMS

Gustavo Ferreira^{1,2}, Marta Marizza¹, Leticia Rodríguez¹

Resumen

En áreas de llanura como la zona central de Argentina, el riesgo de anegamiento de zonas rurales y urbanas está asociado a la presencia de una superficie freática cercana a la superficie. Además, la relación de los niveles freáticos con la producción agropecuaria constituye un tema de investigación creciente dado su enorme impacto socioeconómico. En estas áreas, la posición del nivel freático está en directa relación con los factores climáticos, topográficos y geológicos, el uso de la tierra y la presencia o ausencia de canales de drenaje. Las fluctuaciones de los niveles freáticos están muy influenciadas por la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la evapotranspiración, el drenaje artificial y la percolación profunda. Estos mecanismos tienen importancia relativa diferente en función de la posición del nivel freático respecto de la superficie del suelo.

Conocer la profundidad del nivel freático es tan o más necesaria a escala regional que local, con el fin de implementar estrategias eficaces de manejo de recursos hídricos para la producción agrícola-ganadera y la mitigación del riesgo de inundaciones.

La información satelital surge entonces como una alternativa atractiva brindando la extensión areal deseada con una periodicidad adecuada. El desafío es entonces vincular información remotamente sensada con variables que caractericen el sistema subterráneo.

En este trabajo se presentan los resultados de correlacionar variables derivadas de imágenes satelitales como la evapotranspiración, con la posición del nivel freático, en una estación freatimétrica situada en la llanura central de Argentina, mediante la aplicación de un balance hídrico simplificado.

La metodología aplicada a una serie de 5 años (2004-2009), permitió inferir los niveles freáticos medios mensuales en la zona de estudio los que fluctuaron entre aproximadamente 4 y 8 m de profundidad. Teniendo en cuenta las simplificaciones establecidas en la metodología, la estimación de los niveles fue satisfactoria, ya que el error promedio para el período analizado fue de 0,36 m, correspondiente al 6 % de la profundidad media mensual. En la actualidad, la metodología se está probando en otros puntos de validación para reducir las incertidumbres del método y probar su aplicabilidad en diferentes sectores de la cuenca, con el fin de generar mapas de niveles freáticos a escala regional, que permitan implementar estrategias eficaces de manejo de recursos hídricos.

Palabras clave: teledetección, aguas subterráneas, evapotranspiración

Abstract

In lowland regions of Central Argentina, the flooding risk in urban and rural areas is associated to the presence of a water table near the surface. In addition, the relationship of phreatic levels to crops productivity has gained a growing research interest due to its enormous socio-economic impact. In those areas, the location of the water table is related to climatic, topographic and geologic factors, land use and the presence/absence of drainage canals. The phreatic levels fluctuations are influenced by recharge from precipitation and discharge from evapotranspiration, artificial drainage and deep percolation. These mechanisms have a different relevance according to the location of the water table with respect to the soil surface.

Knowing the depth to the water table is even more important at regional than at local scale in order to implement efficient water resources management strategies for agricultural production and flooding risk mitigation.

Satellite information emerges as an attractive alternative yielding the desired spatial coverage with adequate temporal resolution. The challenge is then; to link remotely sensed information to variables characterizing the groundwater system. In this work, results from the correlation between variables derived from satellites images such as evapotranspiration with phreatic levels by means of a simple water balance are presented. The method was applied at a monitoring station located in a lowland area in Central Argentina. The analysis for a 5 year period (2004-2009), allowed estimating mean monthly

¹ Centro de Estudios Hidro-ambientales, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL) Ciudad Universitaria, CC217, Paraje el Pozo (3000) Santa Fe, Argentina

² Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente. Provincia de Santa Fe. Argentina.
Mail de contacto: cgf@fich1.unl.edu.ar

*Artículo enviado el 16 de julio de 2012
Artículo aceptado el 21 de agosto de 2012*

phreatic levels at the study site, which fluctuated approximately between 4 and 8 m deep. Considering the simplifications set forth in the methodology, the results were considered satisfactory, with an average error of 0.36 m for the analysed period, corresponding to 6 % of the mean monthly water table depth. Currently, the methodology is being tested at additional sites aiming at reducing its uncertainties and expanding its applicability to different sectors of the basin. The final objective is to generate phreatic levels maps at regional maps to help the implementation of water resources management practices.

Keywords: remote sensing, groundwater, evapotranspiration

INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones de los niveles freáticos son el resultado de las tensiones que el ciclo hidrológico y algunas actividades antrópicas ejercen sobre los sistemas de aguas subterráneas, los que se traducen en cambios en el almacenamiento freático (Custodio y Llamas, 1996; Freeze y Cherry, 1979; Kienitz, 1979). Entre todos los mecanismos que influyen sobre los niveles freáticos, la recarga y la descarga de agua subterránea suelen ser predominantes (Rushton y Ward, 1979), por ende la identificación de áreas de recarga y descarga y la cuantificación de ambas son críticas no sólo para conocer la relación entre los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, sino también para una correcta gestión de los recursos hídricos de una zona o cuenca en particular.

Por otra parte, en áreas de llanura, el riesgo de anegamiento de zonas rurales y urbanas está asociado a la presencia de una superficie freática cercana a la superficie (Ferreira y Rodríguez, 2005), en tanto que la relación de los niveles freáticos con la producción agropecuaria se ha tornado un tema de investigación creciente dado su enorme impacto socioeconómico (Nosetto et al., 2009).

A diferencia de otras variables hidrológicas, la densidad espacial de puntos de monitoreo de NF es usualmente escasa como para definir comportamientos regionales y los registros son de corta duración. Además, la heterogeneidad que caracteriza a los medios porosos y la falta de homogeneidad en la toma de datos, hacen que la información que pueda obtenerse de tales series sea de carácter puntual o de alcance local.

Sin embargo, conocer la magnitud de los NF es tan o más necesaria a escala regional que local, con el fin de implementar estrategias eficaces de manejo de recursos hídricos para la producción agrícola-ganadera y la mitigación del riesgo de inundaciones y de sequías. Una opción sería la realización periódica de censos de pozos. Los mapas de niveles (o profundidades) resultantes permiten identificar zonas de recarga/descarga, direcciones y gradientes de flujo, zonas afectadas por bombeo, caracterización de la interacción aguas superficiales/subterráneas, entre otras características. Al menos en países en vías de desarrollo, estos censos se realizan muy esporádicamente y con un fin determinado debido a su alto costo, por lo que no brindan información sobre la evolución histórica del almacenamiento freático, sino sólo estados del sistema en fechas determinadas.

Las aplicaciones de la teledetección dedicadas a la zona saturada son escasas, y generalmente se orientan a caracterizar los acuíferos a partir del mapeo de otras variables que sí pueden ser sensadas remotamente y correlacionadas con datos de campo. En comparación con otras componentes del ciclo hidrológico, el agua subterránea y la humedad del suelo han sido las últimas variables en beneficiarse de la tecnología satelital (Becker, 2006). Usualmente la interpretación de imágenes pretende, a través de la visualización de rasgos geológicos/geomorfológicos de la superficie de la tierra, identificar interrelaciones entre las características superficiales y los sistemas subterráneos (Meijerik, 2007). Por otra parte, Groeneveld (2008), estimó ET a escala anual, a partir del NDVI (índice de vegetación) y lo correlacionó con la profundidad del agua subterránea, encontrando que los métodos basados sólo en el NDVI, subestiman la ET por no considerar la evaporación directa del agua subterránea desde la superficie del suelo para el caso de una zona semiárida con vegetación alcalina arbustiva.

La posición de los niveles freáticos en zonas de llanura está en directa relación con los factores climáticos, topográficos y geológicos, el tipo de explotación que se realiza y la presencia o ausencia de canales de drenaje. En este tipo de ambientes los movimientos horizontales de agua son poco significativos, por lo que predominan los movimientos verticales.

En la llanura central de Argentina, el acuífero freático es de relevancia estratégica desde el punto de vista agropecuario. Es utilizado profusamente como fuente de bebida para el ganado, en una zona eminentemente tambera, y en forma creciente es vinculado a la productividad de los cultivos (Jobbágy y Nosetto, 2009; Nosetto et al., 2009). Contar con mapas regionales de niveles freáticos permitiría, por ejemplo, realizar un cálculo aproximado de la capacidad de almacenamiento de excesos hídricos en la zona no saturada del suelo con anterioridad a la estación lluviosa, teniendo en cuenta su vinculación con el riesgo hídrico de inundaciones urbanas y rurales, y encontrar relaciones funcionales entre la profundidad a la freática y la productividad agrícola.

En la provincia de Santa Fe, Argentina, los registros continuos de NF están disponibles en pocos puntos de observación y las series son de corta duración. Por otro lado, sólo se cuenta con cuatro censos regionales de pozos en cuarenta años (CAAAS, 1976; INCYTH, 1986; INA, 2002; Ferreira et al., 2003). Las fluctuaciones temporales de los NF son

principalmente atribuidas a la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la ET, y en menor medida, el drenaje artificial y la percolación profunda. Estos mecanismos tienen importancia relativa diferente en función de la posición del nivel freático respecto de la superficie del suelo (Ferreira y Rodríguez, 2005).

La información satelital surge entonces como una alternativa atractiva para superar los inconvenientes del monitoreo de NF arriba apuntados, brindando la extensión areal deseada con una periodicidad adecuada. El desafío es entonces vincular información satelital con variables que caractericen el sistema subterráneo (Meijerink, 2007).

El objetivo de este trabajo es correlacionar variables derivadas de imágenes satelitales con la posición del nivel freático a escala mensual, en una estación freática situada en la llanura central de Argentina, mediante la aplicación de un balance hídrico simplificado.

El método planteado es netamente operativo, y sus resultados preliminares alientan la posibilidad de construir mapas secuenciales, convenientemente validados en suficientes puntos, de la profundidad al nivel freático a escala regional.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La provincia de Santa Fe integra la región agrícola-ganadera e industrial de la Argentina que concentra gran parte de la población del país (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA, Agencia Rafaela, 2008). Se encuentra ubicada entre los meridianos de 59° y 63° de longitud oeste y los paralelos de 28° y 34° de latitud sur, en una extensa planicie que se caracteriza por la suavidad de su relieve. La provincia ocupa el segundo lugar en el aporte al PBI agropecuario nacional, con una proporción del 18%, y representa el 21% del área sembrada del país. Es la primera productora de oleaginosas y segunda en la producción de cereales. La variabilidad climática y de suelos que presenta el sector Central de la provincia, no garantiza la rentabilidad de una agricultura pura pero puede incluirse dentro de sistemas mixtos basados en la ganadería lechera y/o de invernada, aportando alrededor del 35% de la producción láctea nacional y del 50% de la producción de carne bovina de la provincia.

El área de estudio comprende la cuenca del Arroyo Cululú, afluente por margen derecha del Río Salado, ubicada en el sector central de la provincia de Santa Fe, aunque una delgada franja de ancho variable correspondiente a sus cabeceras, se ubica al oeste, en la vecina provincia de Córdoba (Figura 1). La cuenca, de aproximadamente 9500 km², posee una amplitud máxima de 130 km en sentido Este-Oeste (E-O) y de 100 km en sentido Norte-Sur (N-S). Desde el punto de vista climático, se caracteriza por un clima templado pampeano. El área está inserta entre las isoterms medias anuales de 18 y 19°C. La preci-

pitación media anual es cercana a los 1000 mm con un leve gradiente decreciente en sentido E-O (serie 1971-2000). La distribución de precipitaciones se concentra en el semestre noviembre-abril con un 75 % del total anual. Los suelos de la zona pertenecen a asociaciones de Argiudoles. La geomorfología del área corresponde a la parte sur de la denominada faja de cañadas paralelas (Iriondo, 1987). La capa más superficial del perfil litológico está constituida por sedimentos loésicos, en los cuales se ubica el acuífero freático. El flujo subterráneo regional es en dirección predominantemente Oeste-Este (Ferreira y otros, 2003), teniendo como nivel de base el río Salado.

En cuanto a la hidrografía, la red de drenaje tiene dirección O-E, en tanto que el Arroyo Cululú tiene dirección N-S. La red de drenaje natural es fuertemente asimétrica, de 210 km de longitud, que se completa con una extensa red de canales artificiales de más de 1000 km. Los inicios de su construcción se sitúan en la década del 1930. Esta red ha sido ampliada a lo largo de los años con redes de drenaje menores o locales (DPOH-FICH, 1995).

El sitio elegido para validar la metodología descripta en la sección siguiente corresponde a la Estación Meteorológica de la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud (EACV) (Provincia de Córdoba), cuyas coordenadas son 30°50'22" de latitud sur y 61°57'35" de longitud oeste (Figura 1). Se encuentra en la cabecera de la cuenca, donde prevalece el movimiento vertical del agua, con escaso escurrimiento superficial, característico de la llanura circundante.

Se cuenta con datos hidrometeorológicos desde noviembre de 1997 y de nivel freático desde septiembre de 2003. La Figura 2 muestra el climograma correspondiente a la serie 1999-2008. Para este período se registró una temperatura media anual de 19,2 °C y una precipitación media anual de 955 mm.

En la Figura 3, se presenta el registro de niveles freáticos y precipitaciones diarios en la estación EACV para la serie septiembre 2003-marzo 2009. Se destaca que hasta julio de 2007 los niveles se medían en forma manual mediante sonda piezométrica, con una periodicidad de lectura de dos veces por semana; en setiembre de 2007 se instaló en el pozo un limnógrafo con datalogger que registra continuamente la profundidad al NF tomando una lectura cada 4 horas. De la observación de las fluctuaciones de los niveles se desprende que el sistema tiene una gran inercia para descargarse. Sin embargo, la respuesta ante eventos de precipitación refleja ascensos más rápidos.

Análisis del comportamiento de ET

Debido a la importancia del proceso de ET en el balance hídrico en ambientes de llanura, primeramente se investigó su comportamiento en la cuenca del Arroyo Cululú. Ferreira et al. (2003, 2009) analizaron inventarios de pozos y registros continuos de profundidad del nivel freático en algunos sitios con el fin de

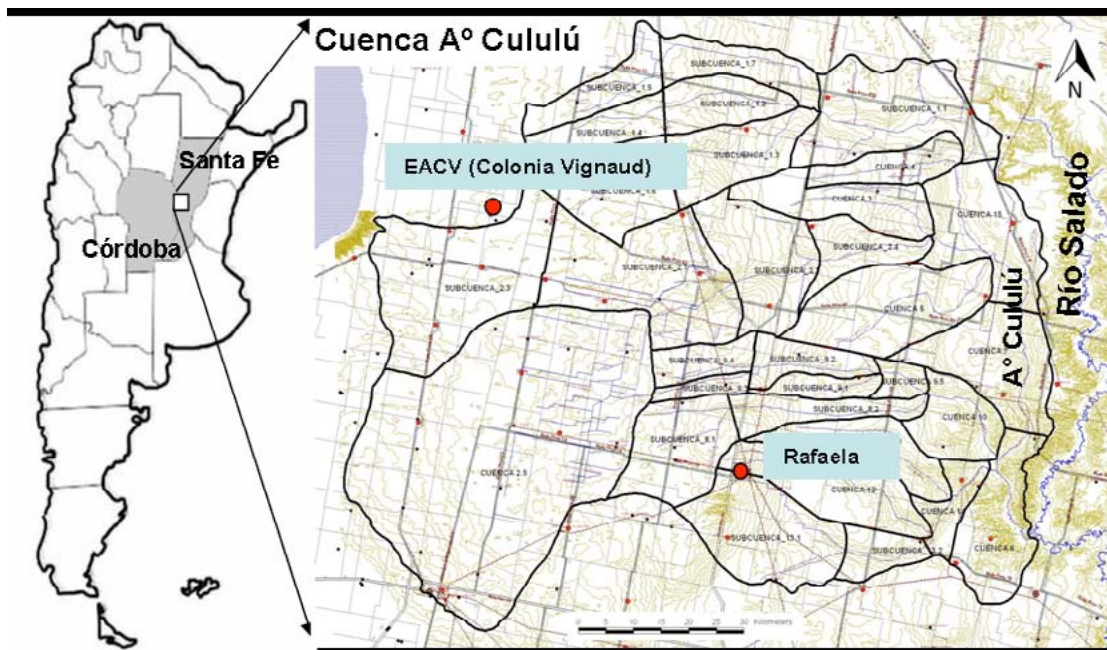


Figura 1. Área de estudio, Cuenca del Arroyo Cululú (Fuente: INA 2007).

estimar la recarga neta anual del acuífero freático y caracterizar los períodos de descarga. Los autores verificaron que la ET juega un papel importante en los procesos de descarga identificando diferentes tasas de descenso de NF según se trate de los meses invernales o estivales (Ferreira y Rodríguez, 2005; Ferreira et al., 2009).

Como ejemplo de la influencia de la ET sobre los NF, la Figura 4 muestra una comparación entre distintas curvas de descensos de NF medios mensuales obtenidas en base a 40 años de registros de NF en la Estación Experimental Agropecuaria Rafaela (EEA Rafaela), del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), situada en la Prov. de Santa Fe, a

64 km al sudeste de Colonia Vignaud (ver localización en la Figura 1).

En la leyenda de la figura se indica el mes y año de inicio del tramo de descenso. Los registros se graficaron en coincidencia con los meses de tres años sucesivos, independiente del año (así el mes de enero en abscisas, corresponde al mes 1, 13, o 25). Ejemplo: la curva de descenso identificada con "x", se inicia en enero de 1976 (mes 1) a una profundidad de 7,88 m, finaliza en febrero del año siguiente (mes 14) con una profundidad de 8,80 m. Se destacan en color los tres períodos de descensos más prolongados registrados en la serie.

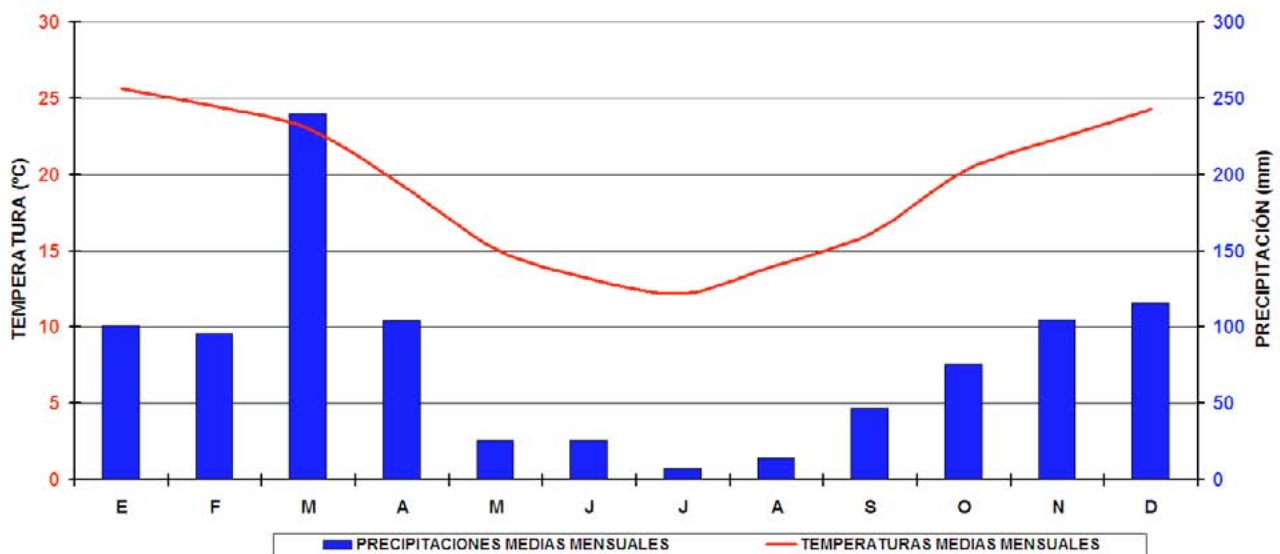


Figura 2. Climograma de Colonia Vignaud (Provincia de Córdoba). Serie 1999-2008.

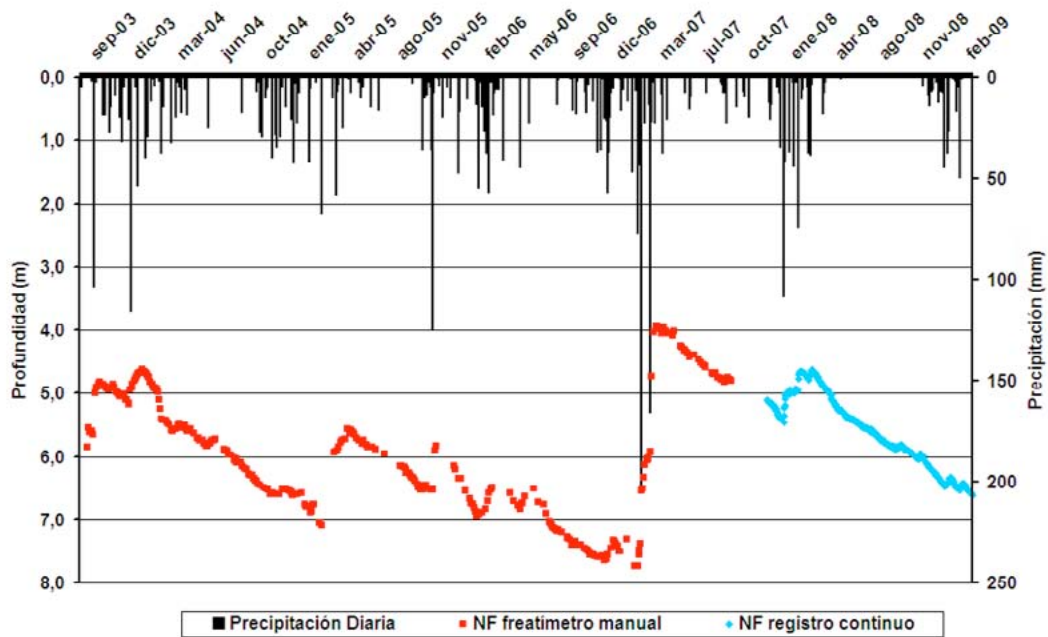


Figura 3. Niveles freáticos y precipitaciones diarias en la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud (EACV)

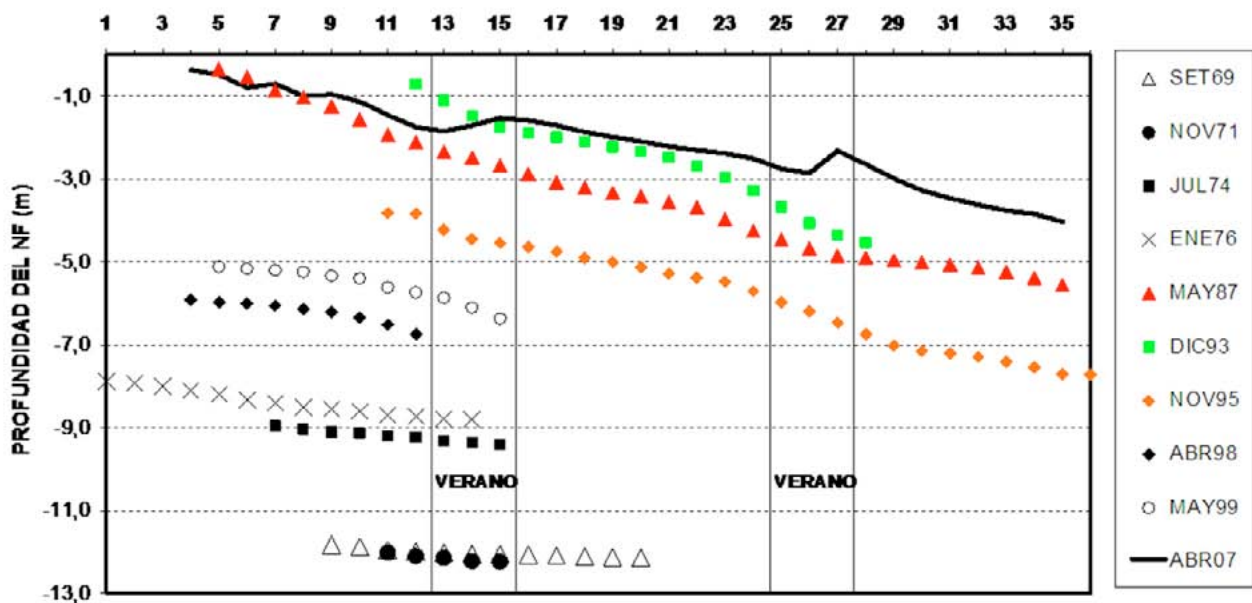


Figura 4. Comparación de tramos de curvas de descenso de niveles freáticos mensuales en la EEA Rafaela, Prov. de Santa Fe. En abscisas se indica el paso de tiempo mensual a lo largo de 36 meses.

La descarga varía con la profundidad reduciéndose a medida que la profundidad aumenta, indicando que el proceso de descarga deviene más lento. Ferreira et al.(2009) encontraron que entre los 2 y 5 m de profundidad los procesos de descarga son muy dinámicos debido a la coexistencia de varios mecanismos que afectan al nivel freático, entre ellos, ET, drenaje artificial y descarga regional del acuífero. Este último proceso esta siempre presente independientemente de la profundidad de la superficie freática, en tanto que los otros dos mecanismos varían en magnitud según el caso. El efecto de la descarga regional se

observa claramente en la Figura 4, en las curvas ubicadas por debajo de los 11 m de profundidad.

Se aprecia que existe un paralelismo en la curva de descenso cuya pendiente está vinculada con la profundidad al NF. A medida que la profundidad aumenta, la pendiente de cada tramo de descenso disminuye, debido a que la ET pierde importancia en el proceso de la descarga subterránea y los niveles descienden más lentamente. Se observa además que durante los meses de verano, y para profundidades aproximadamente menores a 7 m, la pendiente de descenso es mayor que durante el período inver-

nal, por efecto de la ET. Esos quiebres de pendiente entre el verano y el invierno no se observan a profundidades mayores a 7 m, lo que podría reflejar un límite (al menos a nivel local) para la influencia de este mecanismo (Ferreira y Rodríguez, 2005). Este límite local coincide con los valores de profundidad media máxima de enraizamiento obtenido por Canadell et al. (1996) para distintas especies arbóreas, a nivel global (árboles: 7,0+/- 1,2 m). Se debe destacar que en un área de 0,5 km² cercana a la estación freaticométrica, existe una agrupación de árboles de distintas especies, que superan los 10 m de altura.

La línea continua a partir de abril 2007 (mes 4) ilustra el período de sequía más reciente, con una tendencia general al decrecimiento del NF. Sin embargo, durante los meses de verano difiere de los otros períodos de descenso analizados, dado que durante los dos períodos estivales que incluye la curva se registraron eventos de precipitación importantes que dieron lugar a recarga y por ende a un leve aumento en los niveles.

METODOLOGÍA

Datos disponibles

Para el presente trabajo se utilizaron datos diarios de temperaturas extremas, precipitaciones y profundidad del NF de la estación EACV, para la serie enero 2005-marzo 2009.

Asimismo se utilizaron mapas de evapotranspiración real ETR (aquí denominada ET remota) estimada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA - <http://www.sepa.inta.gob.ar/>) para el intervalo temporal correspondiente a enero 2005-marzo 2009 que cubren el área de estudio. Los mapas tienen una resolución es de 1,1 km x 1,1 km, donde cada píxel representa el valor de ET remota máxima de un período de 7 o 10 días, expresado en mm/mes. Los mapas de ET remota son el resultado de la aplicación del algoritmo desarrollado por Di Bella et al. (2000), que se obtiene a partir de una serie de rutinas automáticas de procesamiento de mapas diarios del NDVI y la temperatura de superficie (T_s) obtenidas de imágenes NOAA AVHRR, válido solamente para los meses de primavera y verano, resultando en la ecuación:

$$ET = - 88.3439 + 1.77636T_s + 286.406 \text{ NDVI} \quad (1)$$

donde ET se expresa en mm y T_s en °C. Di Bella et al. (2000) contrastaron ET obtenida mediante la ecuación (1) con ET obtenida de balance hídrico en varios sitios de la llanura central de Argentina, que cubren un amplio rango de cobertura vegetal, desde pastizales naturales hasta agricultura intensiva. Uno de los sitios validados es la EEA Rafaela, por lo tanto se consideró que la ET remota estimada por el mé-

todo de Di Bella et al. (2000) es representativa de la zona de estudio.

Procedimiento de cálculo

La metodología se aplica a nivel mensual y consta de los siguientes pasos:

1. Obtención de la ET remota mensual a partir de varios mapas consecutivos para el píxel correspondiente al sitio de análisis;
2. Aplicación de un balance hídrico simplificado utilizando ET remota para meses cálidos;
3. Obtención de la recta de regresión entre el resultado de 2) y la variación del nivel freático medio mensual observado;
4. Estimación de la ET remota para meses invernales;
5. Aplicación del balance en conjunción con la recta de regresión de 3) para reproducir la evolución temporal de los niveles observados en el sitio de estudio para todo el período de análisis.

El balance hídrico a escala mensual puede expresarse según la ecuación 2:

$$\pm \Delta L = P - ET \text{ remota} \quad (2)$$

donde:

P = precipitación mensual (mm)

ET remota = evapotranspiración real (mm)

ΔL = cambio en el almacenamiento de agua subterránea (mm)

Si $P > ET$, es una situación de exceso hídrico, implica un incremento de agua almacenada en la zona de aireación y eventualmente incrementos del NF por recarga. Si $P < ET$, indica que las salidas en su conjunto son mayores que P , dando lugar a una disminución de la humedad del suelo y una potencial ausencia de recarga, lo que llevaría a una disminución de los NF por efecto del escurrimiento regional. Se debe destacar que ET depende de la disponibilidad de agua y de energía, además del tipo, estado de desarrollo y profundidad radicular de la vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo, la precipitación mensual se obtuvo de los datos meteorológicos de la estación EACV acumulando los datos diarios observados en pluviómetro. La evapotranspiración real mensual resulta de acumular el valor del píxel de sucesivos mapas de ET remota, que contiene las coordenadas de la estación EACV, utilizando el software ENVI (ITT Industries, 2005).

La Figura 5 muestra la correlación entre la variación del nivel freático medio mensual observado (DL, expresado en m) y ΔL obtenido con el balance. El valor de DL se obtuvo a partir de mediciones freatigráficas. Para los meses de primavera-verano del período analizado comprendido entre enero de 2005 y marzo de 2009, el coeficiente de correlación resultó $R^2 = 0,8$ y la recta ajustada (ecuación 3):

$$DL(m) = 3.910^{-3} m / mm * (P - ET_{remota}) + 3.510^{-2} m \quad (3)$$

Previo a inferir la evolución temporal de niveles de agua subterránea para el período de estudio, fue necesario estimar ET remota para los meses invernales dado que no son provistos por el INTA. A partir de estudios previos realizados por el grupo de trabajo,

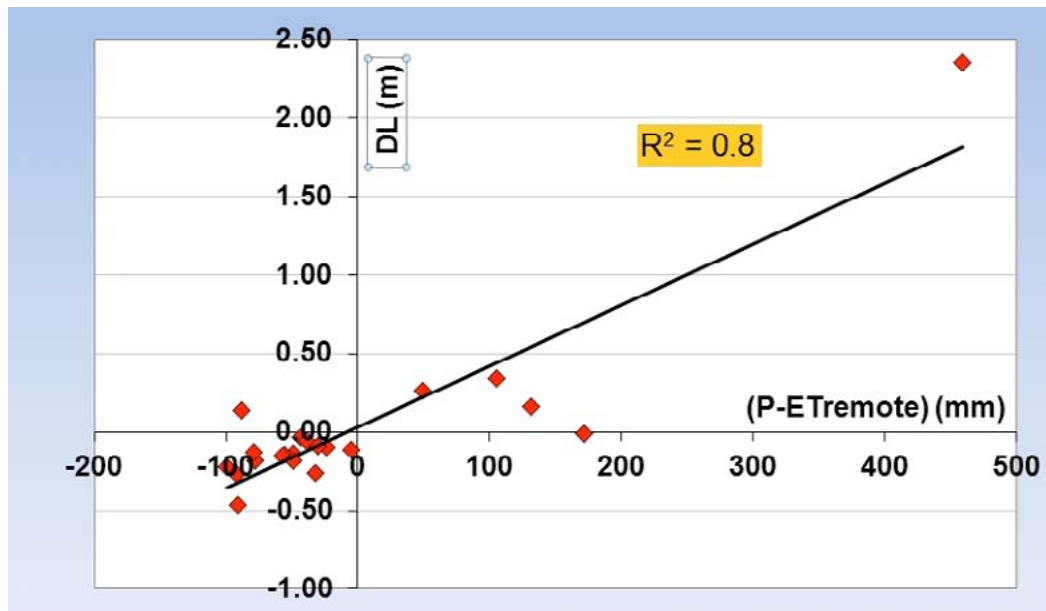


Figura 5. Correlación entre P-ETremota y DL a escala mensual

se estimó la ET para la estación INTA Rafaela mediante las fórmulas de Priestly-Taylor (Priestly y Taylor, 1972), Mankkink (Mankkink, 1957) y Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

Con estos valores se definió una evapotranspiración de referencia ETo promedio mensual, que posteriormente se adimensionalizó (Figura 6) dividiendo el valor mensual por el valor de ETo correspondiente al mes de enero, el de mayor valor en condiciones medias. Por lo tanto al mes de enero le corresponde un coeficiente de ETo adimensional igual a 1.

En este trabajo se asume que la distribución adimensional de la ET remota a lo largo de un año medio tiene igual distribución adimensional que la ETo mostrada en la Figura 6. De esta manera se pudieron calcular los valores de ET remota de los meses que tienen temperaturas medias inferiores a 20°C (para los cuales el INTA no provee datos), partiendo de un mes conocido perteneciente al verano, por ejemplo enero. A modo de ejemplo la ecuación 5 refleja el cálculo de ET remota para el mes de agosto:

$$ET_{remota}(\text{agosto}) = ET_{remota}(\text{enero}) * \text{coef-adim ET}_{remota}(\text{agosto}) \quad (5)$$

Por ende, los coeficientes adimensionales para los meses de otoño e invierno fueron multiplicados por la ET remota de enero de cada año analizado (2005-2009) con el fin de completar la serie de ET para

el período total. La serie de ET remota obtenida fue utilizada en el balance hídrico mensual simplificado para inferir la evolución temporal de los niveles freáticos en el sitio de estudio a partir de la correlación encontrada representada por la ecuación (3).

El NF para un mes determinado, se calculó partiendo del NF del mes anterior, sumando o restando según corresponda, el DL obtenido de la ecuación (3). El cálculo se inició considerando conocido el NF correspondiente al primer mes del período analizado.

La Figura 7 muestra el resultado de la comparación entre valores estimados y observados de NF medio mensual en la estación EACV.

La máxima diferencia entre los niveles medidos y estimados mediante el balance fue de 1,32 m y la mínima de 0 m, con un error promedio de 0,36 m. Cabe destacar que la profundidad media mensual del nivel freático para el período de análisis fluctuó entre 3,98 m y 7,63 m.

La mayor diferencia encontrada corresponde al mes de abril de 2007. Como consecuencia de un evento extremo de precipitaciones (560 mm en un mes), los NF en la región donde se encuentra la estación EACV experimentaron un ascenso mensual récord para la zona de 3 m (Ferreira et al., 2009). La metodología aplicada refleja la ocurrencia del ascenso, aunque no ajusta perfectamente la magnitud del mismo debido

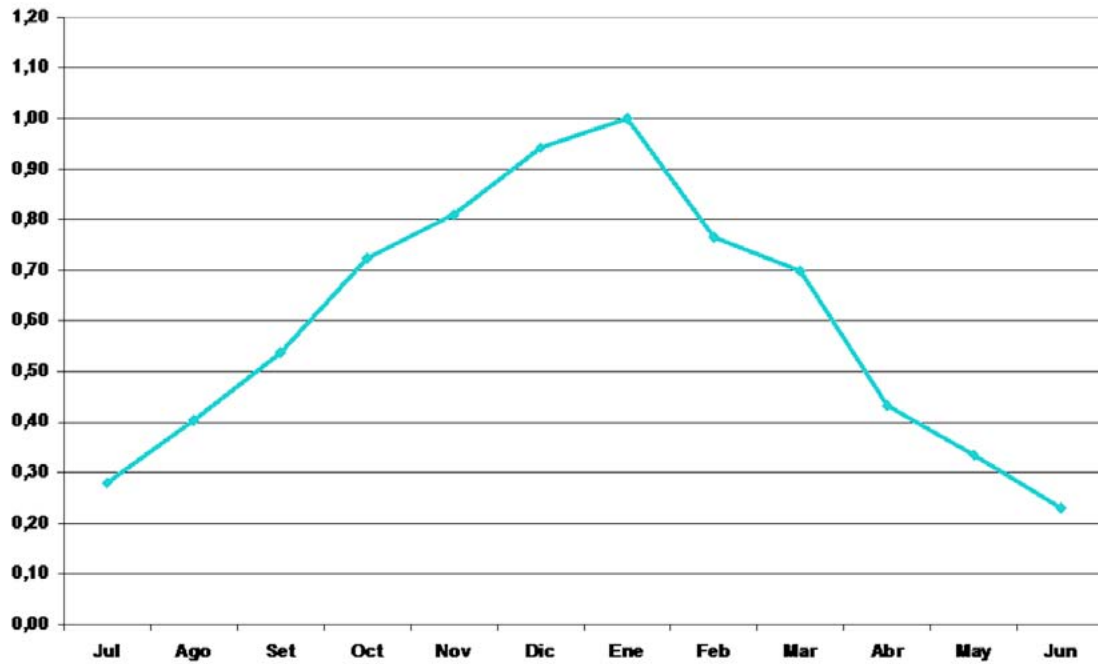


Figura 6. ETo mensual adimensional

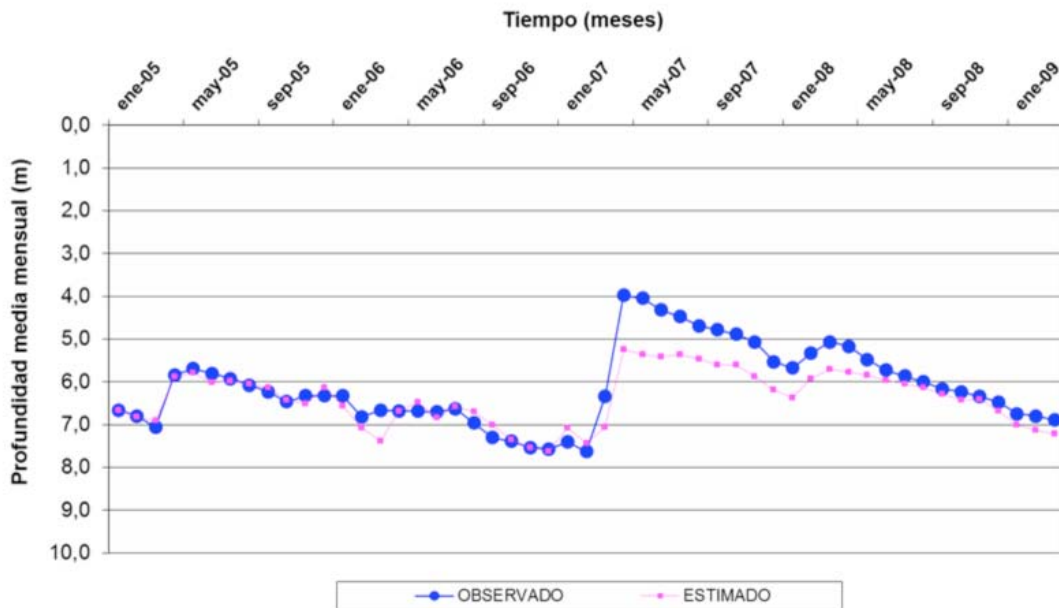


Figura 7. Comparación de valores de NF medio mensual calculados y observados entre Ene2005 y Ene2009

a lo extraordinario del evento. Esa diferencia se va disipando paulatinamente en los meses siguientes de cálculo hasta que prácticamente desaparece un año después, en mayo de 2008. A partir de este mes se obtiene un ajuste muy bueno entre niveles estimados y observados.

CONCLUSIONES

Para el sitio de estudio se verificó que las fluctuaciones temporales más notables de los niveles freáticos observados son aquellas referidas a la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la evapotranspiración real hasta una profundidad cercana a los 7 m. En el período analizado las fluc-

tuaciones de los NF variaron aproximadamente entre 4 y 8 m.

Teniendo en cuenta las simplificaciones establecidas en la metodología, la estimación de los niveles freáticos ha sido satisfactoria, con un error promedio correspondiente al 6 % relativo a la profundidad media mensual, considerando además que se vinculan datos a nivel puntual (pluviómetro y freatómetro) con información satelital a nivel píxel.

La metodología se considera acertada para la zona de recarga de la cuenca en estudio, ya que los resultados obtenidos a nivel mensual muestran que es posible -en términos medios- desprestigiar el flujo superficial.

La recta de regresión encontrada se aplica indistintamente para todo el rango de profundidad observado, sin considerar el diferente comportamiento que presentan las variaciones de los niveles freáticos con la profundidad. Asimismo, la recta se ajusta para la información correspondiente a los meses cálidos y se aplica para estimar los niveles freáticos en los meses fríos. Si bien se introducen errores, para la escala de trabajo se consideran aceptables. La aplicación de esta simple metodología muestra que la utilización de información remota combinada con un modelo sencillo de balance hídrico tiene un gran potencial en el análisis de sistemas subterráneos, minimizando la realización de los costosos levantamientos de campo de escala regional.

En la actualidad, la metodología se está aplicando en otros puntos de validación para reducir las incertidumbres del método a escala espacial. Una vez culminada esta tarea se estará en condiciones de generar los primeros mapas de evolución mensual de NF en la cuenca del Arroyo Cululú. Estos mapas estarán destinados a distintos tipos de usuarios, por ejemplo, los agricultores podrán conocer el estado del sistema subterráneo previo a la época de siembra, a su vez los organismos públicos podrán establecer la condición de humedad de la cuenca antes de los períodos lluviosos, y adaptar estrategias y políticas de prevención de inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al personal del INTA Castellar de la Provincia de Buenos Aires - particularmente Patricio Oricchio- y a la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud por el aporte de datos meteorológicos.

Los estudios desarrollados para la elaboración del presente trabajo han sido posibles, en parte, gracias a los fondos provenientes de la Acción de Coordinación VIAGUA (410AC0399) del Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo) de España y del programa CAI+D de la Universidad Nacional del Litoral de Argentina.

Se extiende el agradecimiento a los dos revisores anónimos cuyos comentarios y sugerencias contribuyeron a mejorar la calidad del trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R.G., L. Pereira, D. Raes, & M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo (Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO.

Becker, M. 2006. Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water. *GroundWater* 44 (2): 306–318.

CAAAS - Convenio Argentino Alemán de Aguas Subterráneas. 1976. Recursos de Agua Subterránea y su aprovechamiento en la Llanura Pampeana y en el Valle del Conlara. Tomo 8. Servicio Geológico de la República Federal de Alemania.

Canadell, J., R. Jackson, J. Ehleringer, H. Mooney, O. Sala & E. Schulze. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108: 583–595.

Custodio, E. & M. Llamas. 1996. Hidrología Subterránea. Ed. Omega. Barcelona. España. T1, 333–335.

Di Bella, C., C. Rebella, & M. Paruelo. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. INTA, IFEVA. Buenos Aires, Argentina.

DPOH-FICH (Dirección Provincial de Obras Hidráulicas – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas) (1995) Préstamo de Protección contra las Inundaciones. Canalización y Obras de Arte Cuenca del Arroyo Cululú. Anexo Específico. Santa Fe. Argentina.

Ferreira, G., G. Farías & L. Rodríguez. 2003. Comportamiento de Niveles Freáticos en Zonas Rurales: Cuenca Inferior del Río Salado, Santa Fe, Anales del 3er. Cong. Arg. de Hidrogeología y 1er. Seminario Hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea. Rosario. Argentina. UNR Editora. T1, 255-262.

Ferreira, G. & L. Rodríguez. 2005. Uso de niveles freáticos para la caracterización de la recarga/descarga. XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina

Ferreira, G., L. Rodríguez, C. Vionnet, J. Choque & P. Marano. 2009. Avances en el conocimiento del acuífero libre de la cuenca del Arroyo Cululú (Provincia de Santa Fe), Argentina. VI Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. La Pampa, Argentina.

Freeze, R. & J. Cherry. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Inc. New Jersey.

Groeneveld, D. (2008) Remotely-sensed groundwater evapotranspiration from alkali scrub affected by declining water table. *Journal of Hydrology* 358, pp. 294– 303. ISSN: 0022 1694. Available at www.sciencedirect.com.

- INA. 2002. Influencia de los Acueductos proyectados en la Provincia de Santa Fe sobre los niveles freáticos. Convenio INA/DPOH-Prov. de Santa Fe. Argentina.
- INA. 2007. Influencia de los cambios físicos y climáticos en el régimen de escurrimiento del Río Salado –tramo inferior. Convenio Ministerio de Asuntos Hídricos de la Provincia de Santa Fe - UNL (FICH) - INA(CRL) - INTA (EEA Rafaela). Santa Fe. Argentina.
- INCYTH. 1986. Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Salado. Centro Regional Litoral. Santa Fe. Argentina.
- INTA-AGENCIA EXPERIMENTAL RAFAELA. ARGENTINA. 28/06/2008. <http://www.inta.gov.ar/>.
- Iriondo, M. 1987. Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Dpto. de Hidrología General y Aplicada. UNL. Santa Fe. Argentina.
- ITT Industries. 2005. ENVI version 4.2. ITT Industries-Solution for data visualization and images analysis. August 2005. Boulder, Colorado-USA.
- Jobbágy, E. & M. Noretto. 2009. Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. XVII Congreso Nacional de AAPRESID. Argentina.
- Kienitz, G. 1979. Hydrological Regime as Influenced by Drainage of Wetlands. IHP. Unesco. Paris. France.
- Makkink G. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. J. Instn Wat. Engrs. 11: 277-288.
- Meijerink, M. 2007 Remote Sensing Applications to Groundwater. IHP-VI, Series on Groundwater No.16. Unesco.
- Noretto, M., E. Jobbágy, G. Sznaider & R. Jackson. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. Field Crop Research 113: 138-148. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.fcr.2009.04.016.
- Priestley, C. & R. Taylor. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review 100 (2).
- Rushton, K., & C. Ward. 1979. "The Estimation of Groundwater Recharge" J. Hydrology 41: 345-361.

VERIFICACION DEL PRINCIPIO ERGODICO PARA UN PROCESO DE DISPERSION EN FLUJOS.

VERIFICATION OF ERGODIC PRINCIPLE FOR A DISPERSION PROCESS IN FLOW.

Alfredo Constain Aragón¹

Resumen

Se presenta en este artículo un análisis de las condiciones por medio de las cuales es alcanzado aproximadamente el equilibrio Termodinámico en el ancho de un flujo natural. En este momento también puede ser aplicado el bien conocido "Principio Ergódico" llevando a conocer cuando un soluto vertido al flujo se extiende casi homogéneamente en la sección transversal del mismo. Esta es la condición de "Mezcla completa", muy importante para estudios de contaminación y de calidad del agua. También es discutida la aplicación de este desarrollo a un par de experimentos con trazadores en un gran río de montaña y un pequeño arroyo en Colombia. Aunque los razonamientos expuestos son termodinámicos en naturaleza, las conclusiones y las ecuaciones derivadas pueden ser aplicadas con facilidad en la Ingeniería.

PALABRAS CLAVE: Trazadores, Longitud de mezcla, estudios de contaminación.

Abstract

It is presented in this article an analysis of conditions by means of which thermodynamic equilibrium is approximately reached across the wide of a natural flow. In this moment also it may be applied the well known "ergodic principle" leading to know when a poured solute is spread almost homogeneously on cross section of flow. This is the "Complete mixing" condition, very important for contamination and quality of water studies. Also it is discussed the application of this development to a couple of practical tracer experiments in a large mountain river and in a small stream in Colombia. Although the reasoning exposed is thermodynamic in nature, the conclusions and derived equations may be applied quite well to Engineering.

KEYWORDS: Tracers, Mixing length, contamination studies.

INTRODUCTION

The fact that most of real human level processes are *all* irreversible gives a special character to those physical events: Thermodynamics allow describing them in a simple and comprehensive way with a surprisingly small degree on details of process (Meyer, 1982) This is especially true for a key totally irreversible phenomenon as Diffusion of solutes in water flowing. Then it is possible to use some thermodynamics concepts to develop a useful approach to calculation of the so-called "Complete mixing condition" in which conservative tracer has dispersed in all cross section of flow.

STREAM MEAN VELOCITY AND DISPERSION VELOCITY OF A TRACER.

When a conservative tracer (solute) is poured in a flow there are two different velocities that should be observed in order to describe properly the physical situation: Stream mean velocity and diffusion velocity. First one, U , characterizes the average advective one-direction motion of flow. Second one, V_{disp} , characterizes two-direction macroscopic motion of

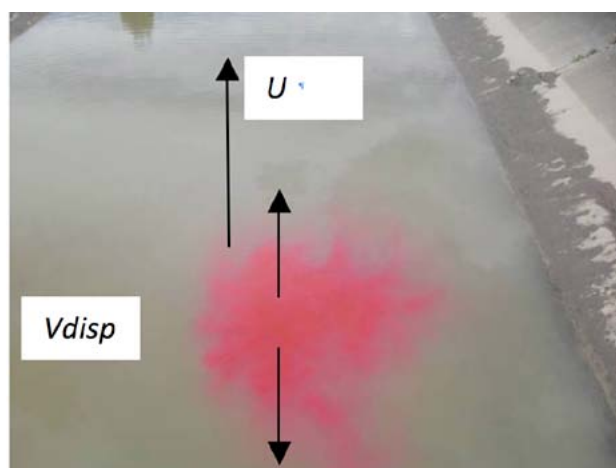


Figure 1. Advective and diffusive velocities for a solute plume in a stream.

tracer plume. Figure 1 However, there is a significant difference among them. Advective stream velocity is a parameter which module value may be repeated several times, whereas it is dependent upon hydraulic condition of considered trench. Diffusive velocity of plume tracer by the other hand cannot repeat in

1. I+D Manager, Amazonas Technologies, Cali, Colombia alfredo.constain@amazonastech.com

module value because is a characteristic of irreversible diffusion process. When the chemical equilibrium is broken due to pouring, a specific mechanism should appear to restore it accord with *Le Chatelier* principle (Prigogine, Kodepudi, 1998) so diffusion velocity is the way in which the tracer tends to spread toward equilibrium as last stage. Then U velocity is not a state function while V_{disp} has this nature. However, there is a certain relationship among them. An increase of advective velocity should lead generally to an increase of dissipative factors (by means of turbulence generated by roughness) and then to a different pattern of diffusion velocity, then it is possible to define a state function, Φ , at constant temperature and pressure, in the following way (Constain, 2011a) (Constain, 2011 b):

$$f = \frac{V_{disp}}{U} \tag{1}$$

It is interesting to develop a specific definition of this function. First one may define a characteristic displacement of diffusion (one variance), Δ using the Brownian one-dimension model, with τ corresponding characteristic time and E the Longitudinal dispersion coefficient.

$$\Delta = \sqrt{2 E t} \tag{2}$$

As Nobel Prize winner I. Prigogine (Prigogine, 1997) had pointed out extensively studying Poincaré's chaotic processes, this model is more general than usually is taken because not only free (thermal) independent molecular motions are Brownian but also potentially (dependent) molecular motions evolve (transmitting disorder) with same law. Now, V_{disp} may be defined as:

$$V_{diff} = \frac{\Delta}{t} \tag{3}$$

Hence:

$$U = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{2E}{t}} \tag{4}$$

Clearing Φ function in this equation and putting it as differential superposition expression:

$$d\Phi = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial E}\right)dE + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial U}\right)dU \tag{5}$$

Using Eq (4) it is easy to verify that $d\Phi$ is an exact differential accordingly with following equation:

$$\left(\frac{\partial}{\partial U}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial E}\right)\right) = \left(\frac{\partial}{\partial E}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial U}\right)\right) \tag{6}$$

And then:

$$\oint_C d\Phi = 0 \tag{7}$$

That is, Φ is a state function as was defined before, and it describes thermodynamic evolution of plume from dissipation point of view in the same way that Chezy's coefficient, C , characterizes friction effect in uniform flow regime, as function of energy line slope, S , and hydraulic radio, R .

$$U = C\sqrt{RS} \tag{8}$$

Here it is interesting to see how the two equations for mean velocity of flow have same structure, following Occam's principle in the sense that Nature does not multiply entities describing same thing.

AN APPROACH TO IRREVERSIBLE EVOLUTION OF TRACER PLUME IN FLOW.

When a closed system (which don't interchange mass with its environment) evolves with temperature and pressure constant there is a function that describes thermodynamic evolution of the system: Gibbs potential, G (Zemansky, 1967).

This function represents the part of enthalpy (formation heat in Hess's scheme) that can be converted in work and then its curve defines the evolution of available energy within system in such way that its decrement $-\Delta G$ indicates how initial energy, ΔH is spent until equilibrium is reached. Figure 2

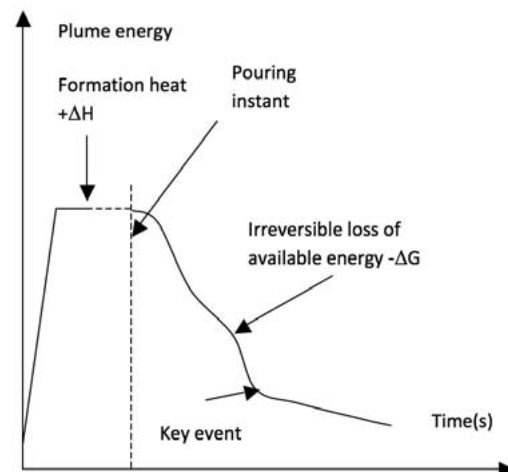


Figure 2. Tracer plume Energy evolution in flow.

Loss of available energy in an irreversible process is related with the increase of entropy (second thermodynamic principle) and then with the way in which the system loss free degrees, regarding the statistical approach to this subject. So, the curve of decreasing G reflects when a key event appears in plume evolution, as for example when tracer has spread along all cross section of flow, ie: the “well-mixing condition”. There is a consideration regarding practical calculation of Gibbs potential in this case: it is not easy to do in the case of tracer evolution because it would be necessary to examine changes in chemical potentials related with the process. In this case it would be more practical to see another thermodynamic function that may play the same role. So it seems more convenient to use $\Phi(X)$ function which presents the

same thermodynamic properties that G but is more specific. (Constain et al, 2009). Figure 3

In this case, to know when a tracer has reached the *complete mixing condition* is enough to know when the $\Phi(X)$ function takes a specific value (Constain et al, 2002).

A SPECIFIC VALUE FOR $\Phi(X)$ FUNCTION IN “COMPLETE MIXING CONDITION” FOR EVOLUTION OF TRACER PLUME IN FLOW.

When tracer plume reaches well-mixing condition it means also that lateral diffusion vanishes also completely. So, chemical equilibrium is reached in Y axis. Figure 4.

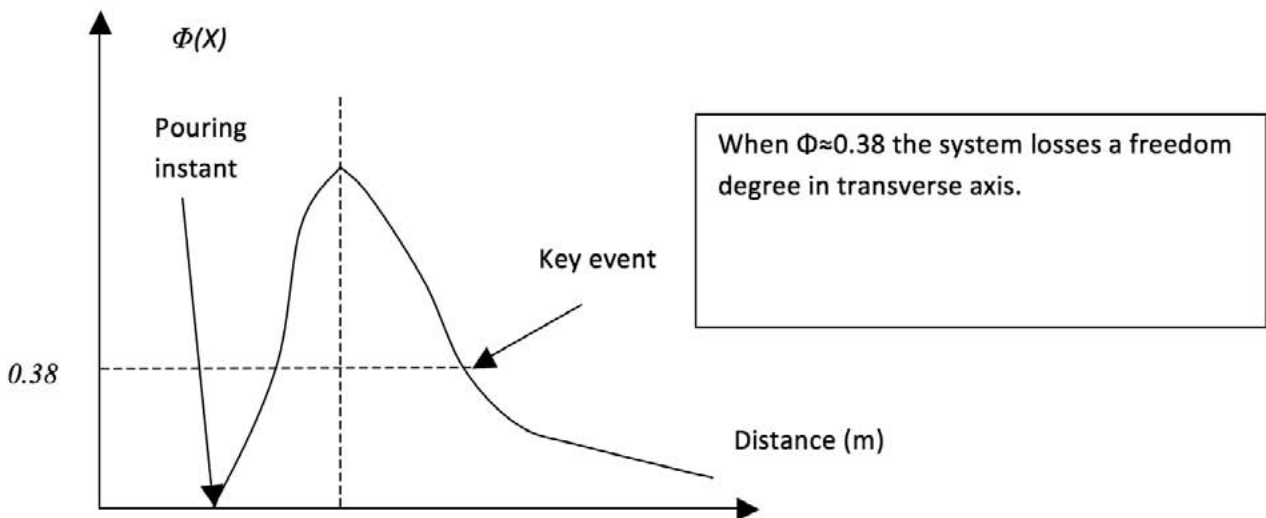


Figure 3. Specific function describing tracer evolution.

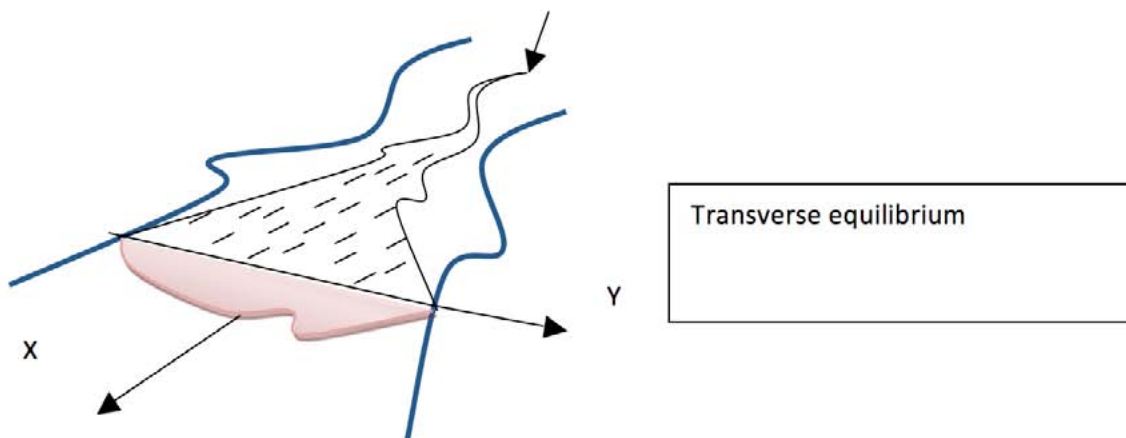


Figure 4. Complete mixing condition for tracer in flow.

If the system is considered as isobaric and isothermal also, then there is approximately thermodynamic equilibrium in Y axis. This is in this way because though there is not diffusion remaining in transversal axis if the process is fully irreversible it remains heat that should be ejected toward environment. This heat represents the internal produced entropy due to ir-

reversibility. In this case thermal and mechanical gradients take congruent values allowing heat transport. At the end, this irreversible transport vanishes when system has spent all initial energy and it cannot be distinguished from environment.

If this approximate equilibrium condition holds, then also processes in this coordinate are stationary.

Hence here is possible to apply the well know *ergodic principle* to the system. This principle has several versions whereas is one of most fertile in physics. One of them very useful to the faced problem is presented in the following way (Pugachev, 1973): For a steady random variable, $Y(x)$, the mean value is constant, then the outcomes for different argument values: $Y(x_1), Y(x_2), \dots, Y(x_n)$ and the outcomes for different functions with the same argument: $Y_1(x), Y_2(x), \dots, Y_n(x)$ are equivalent, leading for the same mean value. Figure 5. This principle means that when tracer has reached *well-mixed condition* there are two different concentrations that are convergent, being useful to know the key value for $\Phi(X)$ function in Mixing Length, Φ_0 . To apply this approach is convenient to define first set of concentration along all volume of tracer where concentrations are peak values for different X coordinate. Figure 5. Second set may be defined conveniently as different concentrations (function of Y coordinate) in a specific distance, X_0 , where is the peak value. Figure 6

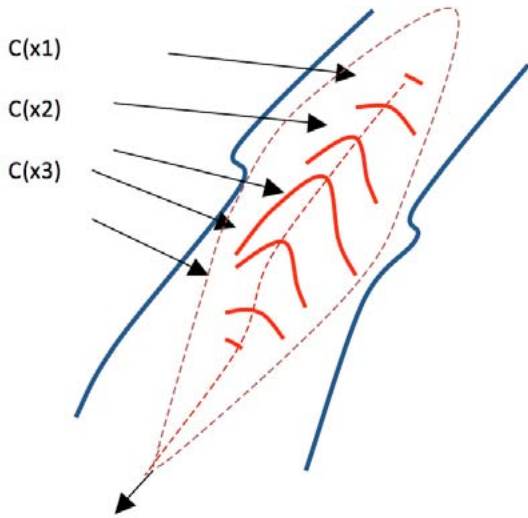


Figure 5. Concentration distribution based on first set.

If we extent the calculation to a infinite number of values for two sets, it states as follows:

$$\bar{C}_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n C_p(x_n)}{n} \quad (9)$$

And

$$\bar{C}_y = \frac{1}{y_{lim}} \int_0^{y_{lim}} C(y) dy \quad (10)$$

It is easy to see that firsts mean concentration along all plume is:

$$\bar{C}_x = \frac{M}{Q \cdot t_0} \quad (11)$$

Here M is the tracer mass poured in injection point (considering conservative solute), Q the discharge of

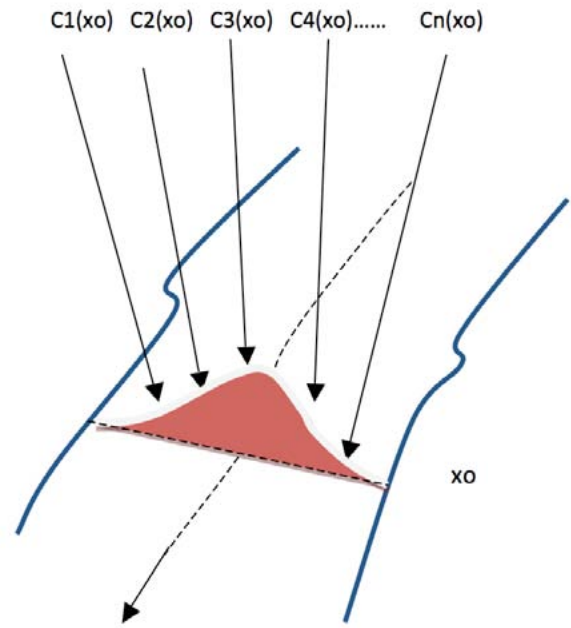


Figure 6. Concentration distribution based on second set.

flow and t_0 to be the time spent from injection point to Mixing length.

For second mean concentration is necessary to use *error function* to integrating the expression. Here y_{lim} is a characteristic value of transverse coordinate related to inflection points of Gaussian bell form.

$$\bar{C}_y = 0.441 \cdot C_{p0} \quad (12)$$

Here C_{p0} is peak concentration value in X_0 , the Mixing Length. Hence, using ergodic principle:

$$\bar{C}_y = \bar{C}_x \quad (13)$$

This means that:

$$\frac{M}{Q \cdot t_0} = 0.441 \cdot C_{p0} \quad (14)$$

Now, to relating this expression with $\Phi(X_0)$ it is necessary to use a modified Fick's equation. This equation results from the replacement of relationship (4) in classical one (15a), Here A is cross section of flow.

$$C(x, t) = \frac{M}{A \sqrt{4pEt}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}} \quad (15a)$$

Therefore,

$$C(x, t) = \frac{M}{Q \cdot \phi \cdot t \cdot \sqrt{2\pi\beta}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{2\beta\phi^2 U^2 t^2}} \quad (15b)$$

Here $\beta \approx 0.215$ from Poisson's analysis of plume evolution. Then, peak value for well-mixed condition is:

$$C_{po} \approx \frac{M}{Q \times \phi_o \times t_o \times 1.16} \quad (16)$$

Replacing Eq (16) in Eq (14) it states:

$$\phi_o \approx \frac{0.441}{1.16} \approx 0.38 \quad (17)$$

This result means that, in every case, tracer plume spreads along cross section of flow when Φ takes the approximate value 0.38.

5. A COMPARISON OF DEVELOPED SPECIFIC VALUE OF Φ O FUNCTION FOR "COMPLETE MIXING CONDITION" AND RUTHVEN'S RELATIONSHIP.

In a science field, when a new formula is developed one of first requirements is that its results being convergent with well accepted formulas. Then new approach should be compared with a well established relationship. Unfortunately due to huge spread of semi empirical formulas about tracer theory, there is not a unique, wide accepted one. However, an approximate definition for Mixing Length due to Ruthven has been very used along the years with satisfactory results:

$$X_o \approx 0.075 \frac{U \sqrt{W^2}}{e_y} \quad (18)$$

Here W is the mean transverse distance (wide) of flow and ϵ_y the transverse diffusion coefficient. Now, this equation is for a centerline injection; for an injection at the side of stream width has to be multiply by two and coefficient to be multiplied by 4, remaining:

$$X_o \approx 0.3 \frac{U \sqrt{W^2}}{e_y} \quad (19)$$

To analyze the issue is necessary to write concentration distribution in transverse coordinate as follows.

$$C(y,t) = C_y = \frac{M}{Q t \phi 1.16} e^{-\frac{(y)^2}{4 \epsilon_y t}} \quad (20)$$

It should be noted that we use C_p value as is defined in Eq (15) due to continuity principle between longitudinal and transversal functions. Now, clearing the value for transverse diffusion coefficient and reordering factors:

$$\epsilon_y = \frac{1}{Ln \left(\frac{\left(\frac{M}{Q \times t} \right)}{C_y \times \phi \times 1.16} \right)} \times \frac{y^2}{4 t} \quad (21)$$

For well-mixed condition in which there is thermodynamic equilibrium in Y axis, tracer concentration value may be replaced by more probable value which in turn is the mean value, accord with Darwin-Fowler principle in statistical mechanics (Morowitz, 1971).

$$C_y \approx \bar{C}_y \approx 0.441 C_{po} \quad (22)$$

Then

$$\epsilon_y = \frac{1}{Ln \left(\frac{(0.441 C_p)}{0.441 \times C_p \times \phi_o \times 1.16} \right)} \times \frac{W^2}{4 t} \quad (23)$$

Hence:

$$\epsilon_y = \frac{1}{Ln \left(\frac{1}{0.38 \times 1.16} \right)} \times \frac{W^2}{4 t} \quad (24)$$

And, replacing time by key distance divided by velocity

$$\epsilon_y \approx 1.2 \approx \frac{U \sqrt{W^2}}{4 X_o} \quad (25)$$

Finally:

$$X_o \approx 0.305 \approx \frac{U \sqrt{W^2}}{e_y} \quad (26)$$

This result is very close to Ruthven's equation for side injection.

SOME CONSIDERATION ABOUT FUNCTION $\Phi(X)$.

Beside the thermodynamic considerations discussed in this article about $\Phi(X)$ there are some characteristics of this function that deserve our attention. First, if it is accepted that skewness of tracer curves in real life is due to a kinematic composition (Galilean transformation) between one-direction mean flow velocity and two-direction diffusion velocity, then ratio of these two kind of velocities is a measure of the observed skewness. Figure 7.

Upper curve shows a higher degree of skewness corresponding to a higher value of $\Phi(X)$ function. Lower curve by the other hand has a lower degree of skewness, corresponding to a lower value of function. Second, experimental values of $\Phi(X)$ have been encountered as high as 0.8 and low as 0.15 in tracer measurements done by author. Third, always is used decreasing edge (green line) of function curve. In practice never has been used other zone of it. Figure 8.

There is another important remark to do at this point regarding the key value of $\Phi(X_o) \approx 0.38$. Once solute

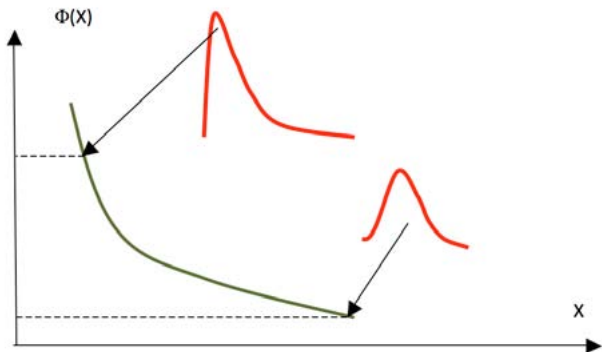


Figure 7. $\Phi(X)$ function as measure of skewness of tracer curve.

reaches homogenous distribution on cross section of plume in flow (“well-mixed condition”) transport in transverse axis *does not* vanish though there is no Y-diffusion by concentration gradient already, this due to *Foret effect* that couples heat transport with substance transport. This fact implies that transverse transport *never* disappears in the lifetime of solute plume. This is actually the main reason to see *skewed* solute concentration curves any time.

To measure this function, author’s special hardware-software tool has been developed, named INIRIDA DEEP FLOW (*IDF*). This equipment displays also other graphical information about hydraulics and mass transport issues of studied stream. Figure 9

It is possible to display in this tool several tracers pouring done in sequence, putting the device at 10m., 20 m, 30 m and so on since 120 m from the injection site, in the chosen reach as is shown in Figure 10. Red arrows are “trigger signals” for software indicating when is done the sudden injection of tracer in flow. Grid in screen for Rhodamine WT is multiply by x 100(so real values are divided by 100).

Photo displayed corresponds to twelve pouring realized in a small mountain stream in Bogota city (“Quebrada La Vieja”) in Colombia. Figure 11 shows a set of screens taken at 10 m far from injection point, using common salt as tracer. The package that operates in real time fashion, offers also a filter function to clean experimental curve and a discharge calculation routine based on conservation of mass prin-

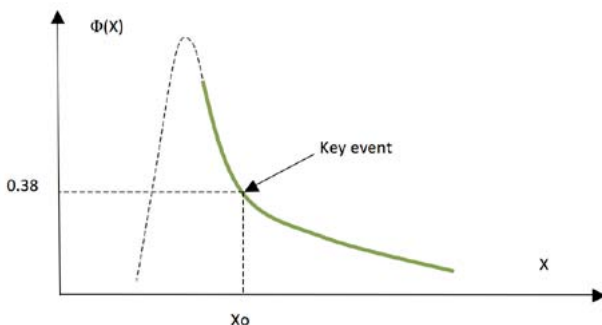


Figure 8. Used zone of $\Phi(X)$ curve in practice.

ciple. In this Figure it is shown a set of screens of this tool with those mentioned aspects. Left photo shows cleaned experimental curve with theoretical modelation on it. Middle photo shows a particular calculation of $\Phi(X)$ function with a value of 0.74 meaning that tracer curve is in the so called “convective” period in which there is a significative lateral diffusion yet. Right photo shows the discharge calculation using mass conservation law (area under curve calculated between start point $t1$ and ending point $t2$).

$$Q_a = \frac{M}{\int_{t1}^{t2} C(t) dt}$$



Figure 9. Inirida Deep Flow (IDF) fluvial tool

$$Q_a = \frac{M}{\int_{t1}^{t2} C(t) dt} \tag{27}$$

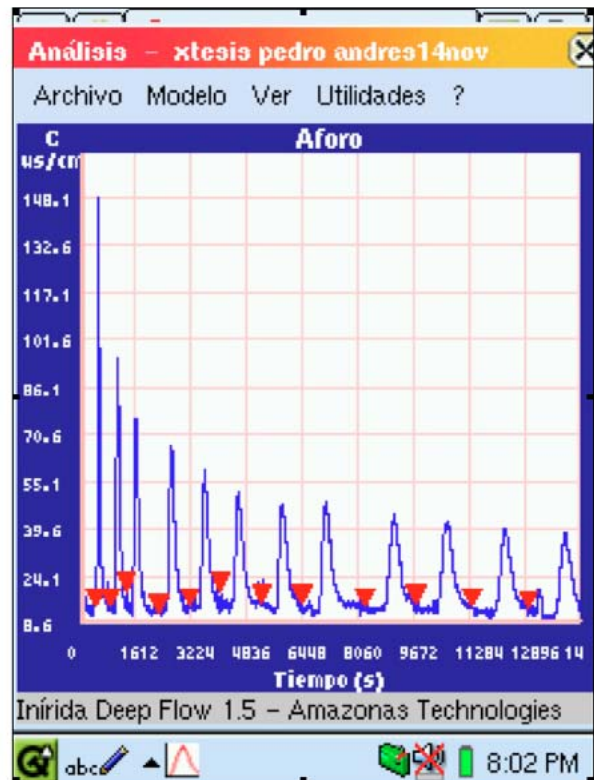


Figure 10. Several tracer curves done in sequence

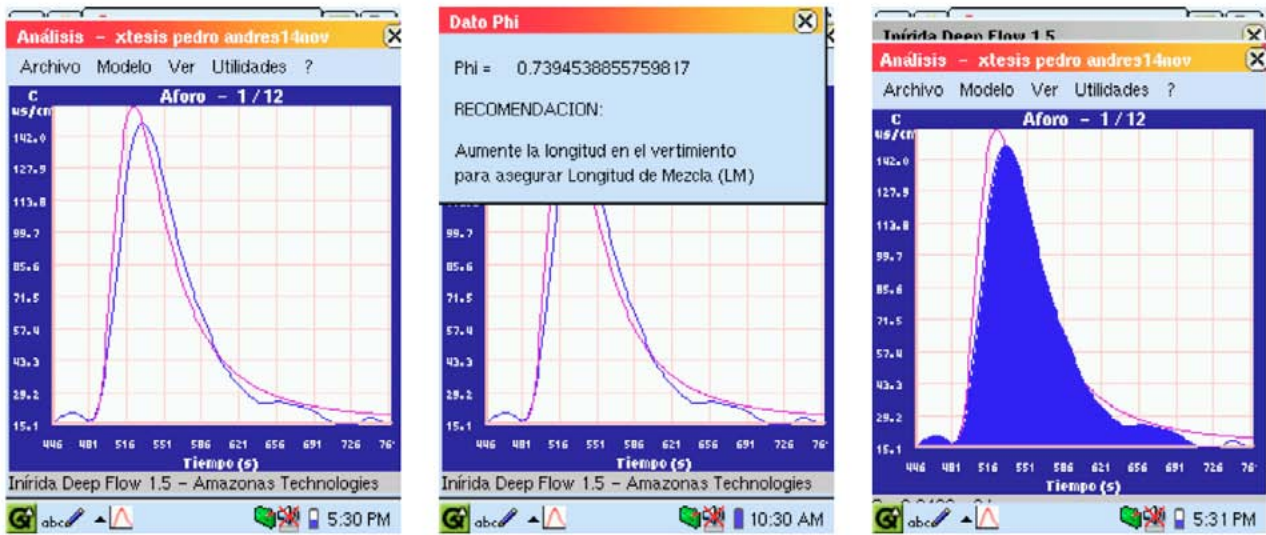


Figure 11. IDF screens shown filter, modelation and calculation routines.



Figure 12. Experimental usage of hardware-software IDF tool in a small stream.

There is also in the middle photo a warning label in Spanish indicating that key value $\Phi \approx 0.38$ is not reached yet and that injection distance has to be enlarged.

Some aspects of measurement task are shown in Figure 12

Experiment is done on a small stream of 0.042 m³/s of discharge and a mean flow velocity of 0.11 m/s.

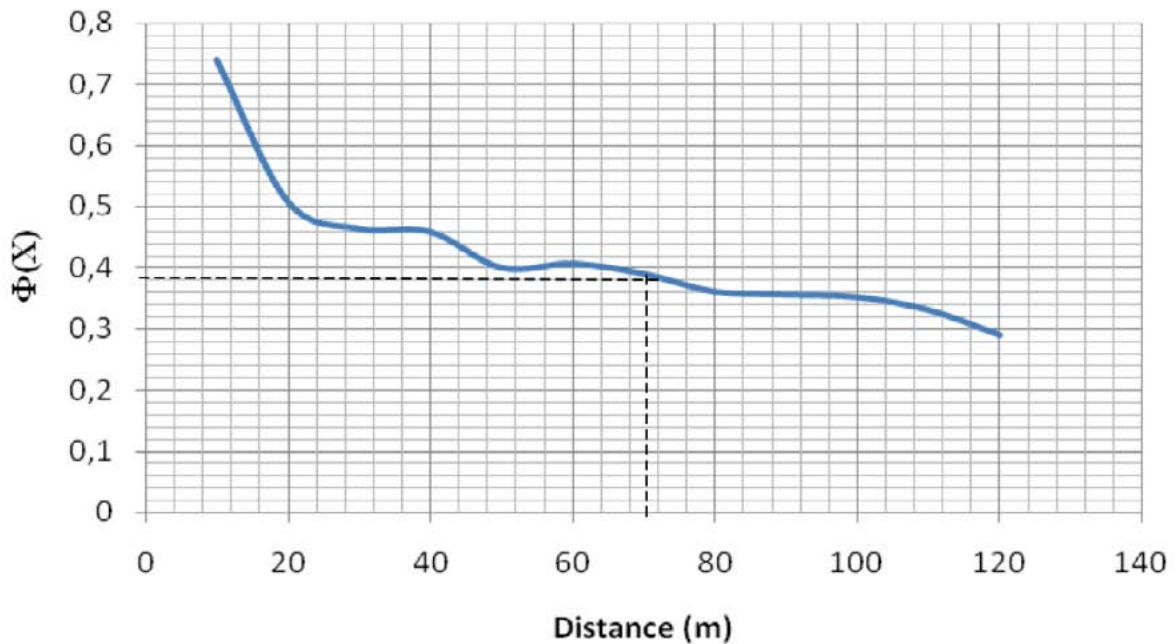


Figure 13. $\Phi(X)$ curve for a 12 tracer pouring experiments.

Figure 13 shows the $\Phi(X)$ curve for all twelve pouring experiments in the trench of 120 m with a mean width W of 1.5 m. This information was downloaded from memory of *IDF* tool. In this curve it is observed, according with theory explained in this Article that well-mixed condition for tracer plume is about 72 m distance in which $\Phi(X) \approx 0.38$ as key value.

EXPERIMENTAL VERIFICATIONS OF “ERGODIC CONDITIONS” AT $\Phi(X_0) \approx 0.38$ RELATIONSHIP.

Small mountain stream (“Quebrada la Vieja”).

As a representative example of these verifications following is shown experiment at $X=70$ m for a journey in the small stream documented before. Selection of this particular result is obvious because mixing length is supposed about 72 m and then in this case the numerical values may be applied to verify theoretical conjectures. Tracer poured mass was 200 grams of NaCl ionic. Data download from *IDF* tool for this particular experiment is in Table 1.

| Data | Value |
|----------|--------------------------|
| M | 200 grms |
| X_0 | 70 m |
| C_{p0} | 16.9 mgr/l |
| U | 0.120 m/s |
| Q | 0.0450 m ³ /s |
| Q_a | 0.0443 m ³ /s |
| t_0 | 583.3 s |

| | |
|----------|-------|
| Φ_0 | 0.39 |
| W | 1.5 m |

Table 1. Data for experiment in “Quebrada La Vieja”.

It should be noted in data of this Table that discharge calculated using Fick’s modified equation, Q , and mass conservation principle, Q_a , are very close numerically with a relative error less than 1%.

Now, the ergodic principle applied to specific conditions of this small stream in Table 1 holds:

$$\frac{M}{Q \times t_0} = \frac{200000 \text{ Mgr}}{45 \text{ l/s} \times 58.3 \text{ s}} \approx 7.26 \text{ Mgr/l}$$

$$0.441 \times C_{p0} = 0.441 \times 16.9 \text{ Mgr/l} \approx 7.45 \text{ Mgr/l}$$

Then key concentrations differs one to each other in a relative error less than 3%. This means that already for $X \approx 70$ m. there is well-mixed condition for tracer in considered flow. This event occurs at $\Phi \approx 0.39$ very close to key value of 0.38 as was stated in theoretical developments.

Large mountain river (“Rio Cali”).

Author’s research team had worked several field journeys between 2005 and 2009 to test ergodic principle applied to tracer plume evolution using *IDF* tool (Amazonas Tech, 2009). Among them there was a case lying in “complete mixing” condition that is studied herein. Tracer used in this occasion was Rhodamine



Figure 14. Author's team at the border of "Rio Cali" stream using IDF tool

WT. Some aspects of that measurement journey are shown in Figure 14.

This is a stream located in Cali city at southwest of Colombia in the day of measurements this river has a discharge approximately of 4.8 m³/s and a mean velocity of 0.76 m/s. This trench of this stream is one

of a typical mountain river with large slope and roughness and meanders with 25 m wide in average.

Next are presented the screens of *IDF* tool for three slug (sudden) experiments done at a distance of 613 m. and with two values of tracer mass. First tracer injection is done with 10 grams and second and third with 4 grams. Left upper photo shows tracer curve

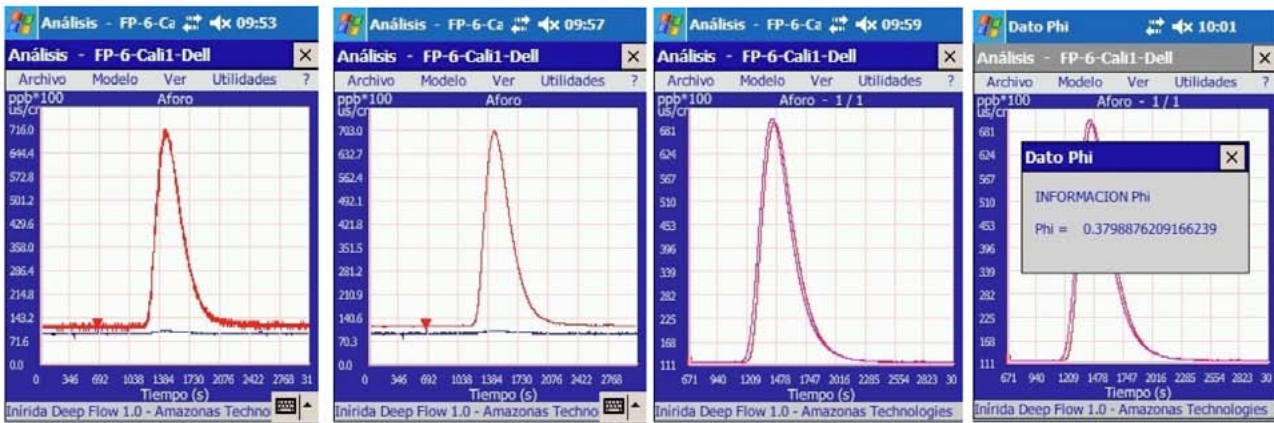


Figure 15. IDF screens with graphical information of first curve and function $\Phi_1(X=613 m)$

with original noise. Middle photo shows action of *IDF* filter cleaning noise spikes and right upper photo shows theoretical modelation using equation (15b) overimposed on real curve. Lower photo shows Φ function measured at $X=613 m$.

1.- First pouring with 10 grams of Rhodamine WT. Figure 15

2. - Second pouring with 4.0 grams of Rhodamine WT.

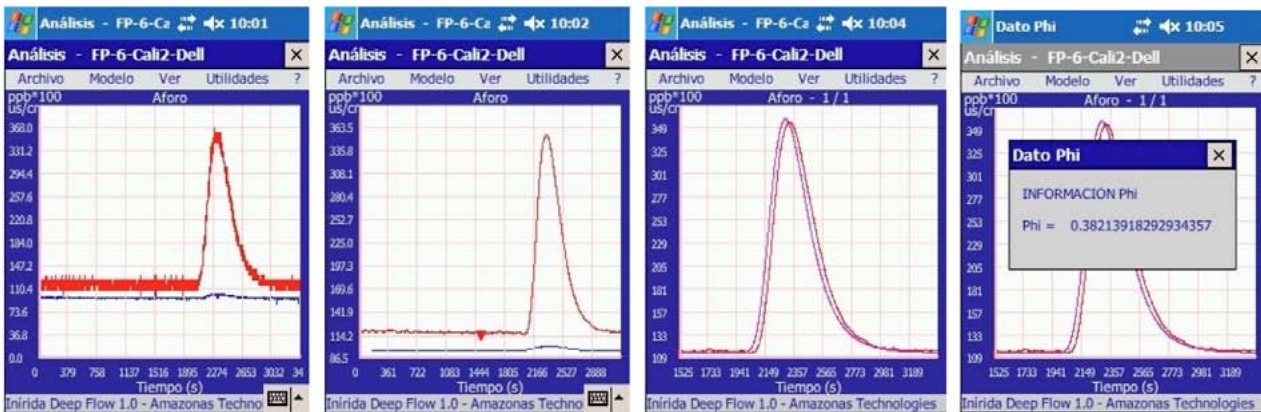


Figure 16. IDF screens with graphical information of second curve and function $\Phi_2(X=613 m)$

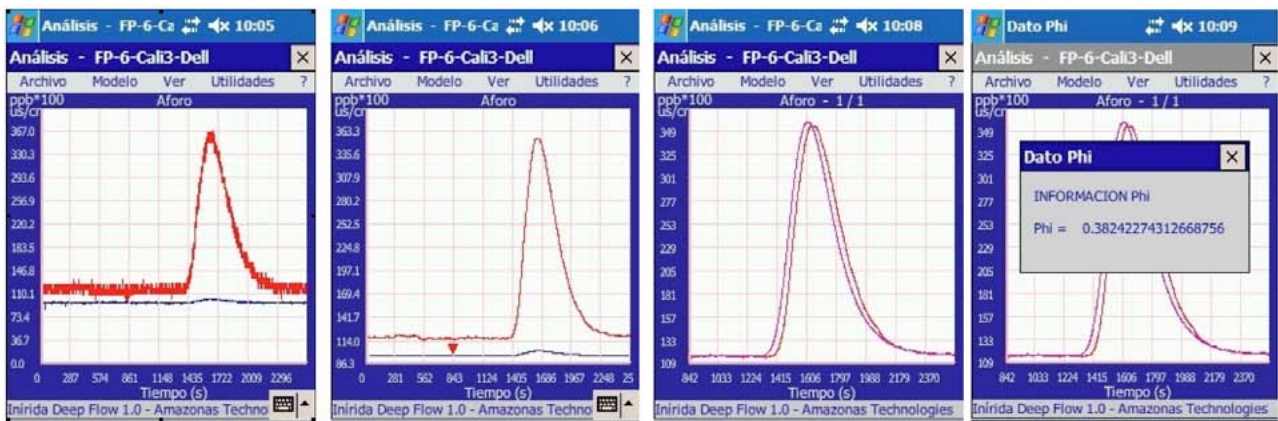


Figure 17. IDF screens with graphical information of second curve and function $\Phi_3(X=613 m)$

Same graphical information is shown for second pouring using 4.0 grams of Rhodamine WT at the same distance. Figure 16.

3. – Third pouring with 4.0 grams of Rhodamine WT.

Graphical information is shown for third pouring using also 4.0 grams of Rhodamine WT at the same distance. Figure 17.

Next is presented Table 2 with most significant data for these three experiments done at a distance in which tracer has filled homogeneously cross section of cloud in flow.

| Pouring | Width W (M) | Distance X (M) | Tracer Mass M (Grms). | Velocity Ux (M/s) | Φ | Time to (Seg.) | Discharge Q (M3/s) | Peak Concentration Cp (Ppb) | Longitudinal dispersion Coefficient E (M2/s) |
|---------|-------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|--------|----------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 1. | 25 | 613 | 10 | 0.78 | 0.380 | 786 | 4.93 | 6.09 | 7.36 |
| 2. | 25 | 613 | 4 | 0.77 | 0.382 | 796 | 4.75 | 2.48 | 7.40 |
| 3. | 25 | 613 | 4 | 0.77 | 0.382 | 796 | 4.77 | 2.44 | 7.40 |
| Average | 25 | 613 | --- | 0.76 | 0.381 | 793 | 4.82 | ---- | 7.61 |

Table 2. Data for three experiments done with Rhodamine WT.

In following calculations it is assumed that $1 \text{ ppb} = 1 \mu\text{Gr/l}$ approximately. Now, the ergodic principle applied to specific conditions of this large stream in Table 2 holds as follow:

1.-First Rhodamine WT pouring

$$\frac{M}{Q \times t_o} = \frac{10'000.000 \mu\text{gr}}{4930 \text{ l/s} \times 786 \text{ s}} \approx 2.58 \mu\text{gr/l}$$

$$0.441 \times C_{po} = 0.441 \times 6.09 \mu\text{gr/l} \approx 2.69 \text{ Mgr/l}$$

In this case relative error is about 5%.

2. - Second Rhodamine WT pouring

$$\frac{M}{Q \times t_o} = \frac{4'000.000 \text{ Mgr}}{4750 \text{ l/s} \times 796 \text{ s}} \approx 1.06 \mu\text{gr/l}$$

$$0.441 \times C_{po} = 0.441 \times 2.48 \mu\text{gr/l} \approx 1.09 \mu\text{gr/l}$$

In this case relative error is about 3%.

3. - Third Rhodamine WT pouring

$$\frac{M}{Q \times t_o} = \frac{4'000.000 \text{ Mgr}}{4770 \text{ l/s} \times 796 \text{ s}} \approx 1.05 \mu\text{gr/l}$$

$$0.441 \times C_{po} = 0.441 \times 2.44 \mu\text{gr/l} \approx 1.08 \text{ Mgr/l}$$

In this case relative error is about 3% also.

REMARKS AND CONCLUSIONS.

1. It is possible to define a general and useful formulation of tracer plume evolution in an isothermal and isobaric flow by means of Gibbs function. This function describes how is spent the formation energy of solute in a turbulent environment toward the equilibrium. More restricted but easier to use is a special state function, $\Phi(X)$, which is related with a mean velocity equation. When there is the so called "well-mixed condition" (tracer spread on

all cross section of flow) this function has the value 0.38.

2. This approach is convergent with classical ones, as for example Ruthven's empirical equation. Using the condition $\Phi \approx 0.38$ is possible to obtain Mixing Length, X_0 .
3. Current methods usually limit two different stages in tracer evolution: "Convective" period in which there is significant transverse diffusion and "Diffusive" period in which only is longitudinal dispersion. First period occurs in earlier moments of plume transport and currently is supposed that tracer curves are much skewed, lacking a formal representation in Gaussian form. Within the theory presented by author, it is assumed that this kind of asymmetry is not a real but a virtual effect, which allow accepting this kind of curves like Gaussian in every moment.
4. The Ergodic principle which is the foundation of new method is examined for two different streams, finding that this condition for "Mixing length" is convergent with experimental results.
5. Presented methodology allows to do critical solute fate studies since in current procedures it is not possible to interpret plume evolution, avoiding to get a very important information on water quality methods.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES.

- Amazonas Technologies (2009), Fomipyme project, final report (internal circulation). Bogota, Colombia (Non published).
- Constain A., Agredo O., Carvajal J. (2002). Applications of a new mean flow velocity equation in streams. *River Flow*, Lovaine la neuve.
- Constain A., Carvajal A Carvajal., J. (2009). Accurate measurement of discharge using Rhodamine WT. IAHR Intl. Congress, Vancouver.
- Constain A., (2011a) Svedber's number playing a main role in diffusion processes. (to be published) *European Physics Journal*.
- Constain A., (2011b) Is storage mechanism in Dead Zone model violating second principle? (to be published) *European Physics Journal*.
- Meyer R. (1982) , *Introduction to mathematical fluid dynamics*. Dover publications, New York.
- Morowitz H.J. (1971). *Entropy for biologist: An introduction to thermodynamics*. Academic Press, New York.
- Prigogine I., Kondepudi D. (1998). *Modern Thermodynamics*. Jhon Wiley & Sons. New York.
- Prigogine I. (1997). *El fin de las certidumbres*. Taurus, Bns As.
- Pugachev V.S. (1973). *Introduction to Probability theory*. Nauka Editors, Moscow.
- Zemansky M.W. (1967), *Heat and thermodynamics*. Mc Grw-Hill, New York.

APLICACIONES PRÁCTICAS DEL PRINCIPIO ERGÓDICO A LA CONDICION DE “LONGITUD DE MEZCLA” USANDO TRAZADOR: ANÁLISIS DE DOS CAUCES NATURALES EN COLOMBIA (RÍO PANCE Y RIO CALI).

PRACTICAL APPLICATIONS OF ERGODIC PRINCIPLE TO “MIXING LENGTH” CONDITION USING TRACERS: ANALYSIS OF TWO NATURAL STREAMS IN COLOMBIA (PANCE AND CALI RIVERS).

Alfredo José Constain Aragón¹

RESUMEN

En un artículo anterior para la Revista *Aqualac* (Constain, 2012), el autor ha presentado un nuevo método para verificar la distancia a la cual un soluto conservativo vertido en un flujo alcanza la “Mezcla completa”, o sea llena de manera uniforme el área de la sección transversal de la corriente. Como quiera que es interesante considerar más aplicaciones prácticas de este método, se presentan en detalle dos casos reales: Río Pance y Río Cali que son grandes ríos de montaña en el sur de Colombia. Este nuevo método tiene la ventaja de contar con una función determinista que indica cuando se cumple esta condición para el trazador considerado. Esta herramienta teórica puede ser de gran valor en los estudios de Calidad de Aguas en los que esta condición es de primordial importancia.

Palabras clave: Mezcla completa, trazadores conservativos, hidráulica fluvial, calidad de aguas

ABSTRACT

In a prior article in *Aqualac Journal* (Constain, 2012), the author has presented a new method to verify the distance in which a poured conservative solute reaches the “Complete mixing” condition, i.e.: it fills uniformly the cross section of current. Whereas that is interesting to consider more practical applications of this method, it is presented in detail two real cases: Pance River and Cali River which are two large mountain rivers in southern Colombia. This new method accounting as an advantage to have a deterministic function that indicates when it is accomplished this condition for considered tracer. This theoretical tool may be of great value for Water Quality studies in which this condition is of major importance.

Key words: Complete Mixing, conservative tracers, fluvial Hydraulics, Water quality.

ANTECEDENTES

De acuerdo con la literatura técnica corriente (French, 1986) (Holley, 1969) (Fischer, 1968) la ecuación conservativa elemental de balance de masa (1) debe representar apropiadamente el transporte dispersivo y advectivo en un flujo natural. En ella C es la concentración promedio en la sección transversal, U es

la velocidad media del fluido y E es el Coeficiente Longitudinal de Dispersion. Para establecerla se considera que el transporte difusivo vertical y transversal (en Z y en Y) ya se ha cumplido y que un patrón inicial (cobertura parcial de la sección transversal por el soluto) Figura 1 A. se convierte en un patrón de cobertura total de tal sección. Figura 1 B.



Figura 1. A.- Zona limitada B.- Cobertura total

¹ Ingeniero, Gerente y Director I+D Hydrocloro Ltda, Bogotá DC, Colombia. alfredo.constain@gmail.com

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Esta ecuación (1) es la llamada relación básica de Taylor para la Advección-Dispersión (ADE) de un trazador conservativo (sin fuentes ni sumideros de masa). Como su nombre lo indica se considera explícitamente independientes los términos de advección (dependiente del movimiento macroscópico del flujo) y de dispersión (dependiente de las fluctuaciones). Su solución es la bien conocida función de Fick (2) que describe el comportamiento de la concentración promedio en el plano móvil asociado al centro de masa de la pluma, donde A es el área de la sección transversal del flujo y M es la masa de trazador vertida súbitamente.

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi t E}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}} \quad (2)$$

Estas dos expresiones básicas del transporte de masa, además de requerir que el trazador llene uniformemente la sección transversal implican que el coeficiente longitudinal de dispersión, E , sea constante para que el transporte dispersivo por fluctuaciones no dependa sino del gradiente de concentración (si E fuese una variable habría un factor extra de variación-diferente al gradiente mismo-). Esta consideración lleva a imponer la condición adicional de flujo uniforme, para el cual E es constante.

UN MODELO ALTERNO QUE DESCRIBE LAS CURVAS REALES DE TRAZADOR A PARTIR DE UN CONCEPTO NO ESTACIONARIO DEL PROCESO.

En un artículo previo del autor mostro que para garantizar el cumplimiento de las ecuaciones básicas no es necesario imponer estas condiciones tan restrictivas y que por el contrario un coeficiente de transporte función del tiempo es apropiado para que los modelos teóricos se acoplen a las curvas experimentales, ya que debe incorporarse en la descripción la posibilidad de más de un sistema inercial mediante esta ampliación de la naturaleza de E . Esto implica definir una velocidad media del flujo con la siguiente forma (Constain, Lemos y Carvajal 2002):

$$U = \frac{1}{f(t)} \sqrt{\frac{2E(t)}{t}} \quad (3)$$

Aquí τ es el tiempo característico de dispersión y $\Phi(t)$ es una función que describe el grado de asimetría de la curva de concentración. La función $\Phi(t)$ que aparece en esta ecuación es en realidad una función

de estado y por lo tanto da cuenta de la evolución termodinámica de la pluma de soluto.

NATURALEZA DE LA FUNCION $\Phi(X)$.

Llama la atención la función $\Phi(t)$ en tanto que ella defina la asimetría de la curva de trazador como se ha establecido antes. Un primer aspecto a tener en cuenta es que en realidad su definición primordial tiene que ver con ser la razón entre velocidad de dispersión longitudinal, V_{disp} , y la velocidad advectiva, U .

$$f(t) = \frac{V_{disp}}{U} \quad (4)$$

Esto se cumple si la velocidad de dispersión tiene una forma Gaussiana mono-dimensional, tal como postuló Taylor inicialmente (y por lo tanto cumpliendo con la ecuación de Fick). Se puede definir esta velocidad en función de un desplazamiento, Δ y un tiempo τ característicos de la siguiente forma:

$$V_{disp} = \frac{\Delta}{t} = \frac{\sqrt{2Et}}{t} = \sqrt{\frac{2E}{t}} \quad (5)$$

Como se observa repetidamente la dispersión- y por lo tanto su velocidad- dependen grandemente de lo que ocurra en el eje transversal (a lo ancho del flujo). (Constain, Lemos y Carvajal, 2003) Entonces, si el transporte transversal se va extinguiendo paulatinamente, el efecto cortante sobre una distribución aleatoria de partículas de soluto en el campo de velocidades del flujo irá atenuándose en el tiempo. Por lo tanto la velocidad de dispersión deberá ir disminuyendo necesariamente con el tiempo, es decir es un evento asociado al devenir unidimensional de la flecha del tiempo. Si se toman V_{disp} y U como velocidades inerciales que son compuestas por un observador euleriano fijo al borde del flujo, esta composición de Galileo llevará a que se produzca una *asimetría* en la forma de la curva de trazador, que es lo que experimentalmente se observa. Naturalmente este es un efecto puramente cinemático (correspondiente en este caso al observador euleriano) y no un efecto real de almacenamiento temporal de las partículas de trazador en zonas periféricas ("zonas muertas") (Constain, 2012).

En segundo lugar, la creación de la velocidad de dispersión, V_{disp} , se puede ver como un mecanismo de reacción del tipo Le Chatelier a la inyección súbita y perturbadora de una masa de trazador al flujo. Por lo tanto esta velocidad irá a tomar valores compatibles con el desarrollo de la creación de entropía interna y su expulsión al medio ambiente, es por lo tanto una función de estado.

DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA DE CÁLCULO DEL TRANSPORTE CON BASE EN UNA VISION FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS DE TRANSPORTE.

Cálculo del Coeficiente longitudinal de dispersión:

Para desarrollar una metodología específica a partir de estas ideas nuevas interesa en primer lugar despejar el Coeficiente E . Se puede demostrar que la relación que existe entre τ como tiempo característico y t como tiempo general (variable independiente) está determinada por la distribución de Poisson aplicada al movimiento totalmente aleatorio (estadístico) de las partículas del trazador. (Constain, Lemos y Carvajal, 2006) Esta relación numérica es:

$$\frac{t}{\tau} = b \approx 0.215 \tag{6}$$

Por lo tanto despejando E en la ecuación (3) queda:

$$E = \frac{f^2 U^2 b t}{2} \tag{7}$$

Cálculos prácticos de U y ϕ :

En la práctica, tanto U como ϕ y la misma t se miden en la curva de soluto en examen, conociendo la distancia desde el punto de inyección súbita y el punto de medición fijo en la orilla y estableciendo el tiempo transcurrido entre estos dos eventos. En la Figura 2 se muestra una pantalla de un instrumento de software útil para medición y análisis de cauces con el tiempo como abscisa ($T=segundos$) y la conductividad específica como ordenada ($C=uS/cm$).

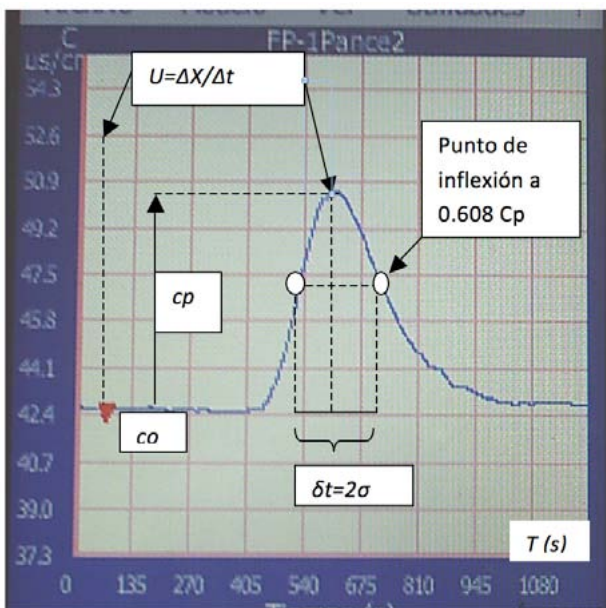


Figura 2. Medición práctica de U y ϕ a partir de los datos de la curva de trazador

En esta pantalla se muestra el instante de inyección súbita de una masa determinada de trazador mediante una pequeña flecha roja. La curva de trazador (sal común en el caso mostrado) se sobrepone en una conductividad específica de fondo co , correspondiente al aporte iónico del lecho y la escorrentía. La Conductividad específica cp es la “altura” de la curva desde la base (co) hasta el pico. La velocidad promedio del flujo U se calcula entonces por la razón entre la distancia ΔX (dato conocido de entrada) y el tiempo entre la flecha roja y el pico de la curva.

$$U = \frac{\Delta X}{\Delta t} \tag{8}$$

En la misma Figura 2 se hacen los cálculos para la función ϕ . De la teoría Fickiana básica y de la definición temporal para E se tiene que:

$$dt = 2s = 2\sqrt{b} f t \tag{9}$$

Por lo tanto ϕ se calcula a partir de la siguiente fórmula con todos los datos conocidos, ya que δt y t se miden en la curva y $\beta \approx 0.215$:

$$f(t) = \frac{dt}{2 t \sqrt{b}} \tag{10}$$

Esta definición es importante pues permite calcular de manera práctica la función de asimetría en cada punto de la propagación de la pluma de trazador, a partir de mediciones temporales fáciles de realizar sobre la curva de concentración.

REDEFINICION DE LA FUNCION DE FICK Y CÁLCULO DEL CAUDAL

Si se parte de la ecuación (3) y se reemplaza en la ecuación clásica de Fick (2) se llega a una nueva relación para la concentración del soluto en función del tiempo. Aquí el sumando Co es la concentración salina de fondo del cauce considerado. El caudal Q aparece por cuanto en la expresión final del denominador aparece el producto área por velocidad ($U \times A$).

$$C(t) = \frac{M}{Q \times \phi \times t \times \sqrt{2\pi\beta}} e^{-\frac{(X-Ut)^2}{2\beta\phi^2 U^2 t^2}} + Co \tag{11}$$

Esta ecuación que resulta de definir al Coeficiente Longitudinal de dispersión como función del tiempo, y por lo tanto acoplado a la realidad bidimensional del proceso de transporte difusión-dispersión, representa de forma muy precisa las curvas experimentales de trazador, a diferencia de la ecuación clásica, como ya se ha señalado. También, a partir de la ecuación modificada de Fick anterior se puede expresar el valor del caudal, según la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{M}{C_p \phi t \sqrt{2\pi\beta}} \quad (12)$$

Esta expresión es interesante por cuanto evidencia que el caudal (dato hidráulico primordial) es un parámetro *interno* del método propuesto y por lo tanto con una obligación directa de ser congruente con los demás datos. En las metodologías corrientes de transporte de masa, el caudal es un dato *externo* y por lo tanto sin un encadenamiento directo con los datos propios de los modelos convencionales.

LA FUNCION $\Phi(x)$, MEZCLA COMPLETA, EQUILIBRIO Y PRINCIPIO ERGODICO

Al ser $\Phi(t)$ una función de estado necesariamente es sensible a las modificaciones o cambios que haya con respecto al número de grados de libertad del sistema. Por lo tanto es de esperar que cuando el transporte transversal por gradiente de concentración se atenúe y desaparezca, la función de asimetría $\Phi(t)$ tome un valor especial que refleje ese hecho notable. Según fue explicado detalladamente en un trabajo anterior del autor (Constain, 2012), el valor que toma esta función recién se cumple que la sustancia trazadora llena uniformemente la sección transversal- para un tiempo t_0 - es:

$$\phi(t_0) \approx 0.38 \quad (13)$$

Aunque estrictamente el equilibrio es un concepto volumétrico, para este caso se puede considerar sin un error significativo que a lo largo del eje transversal (a lo ancho), aproximadamente vale el equilibrio químico, y si es un sistema físico usual a nivel humano con características isobáricas e isotérmicas, vale también asintóticamente el equilibrio termodinámico. (Prigogine y Kondepudi, 1998) Por lo tanto, en estas condiciones se puede aplicar el teorema ergodico introducido originalmente por L. Boltzmann como la igualdad de promedios espaciales en un instante y promedios temporales en un punto (Lande, 1968); reinterpretado para el caso de las concentraciones de trazador se hacen convergentes la colección de un solo valor de concentración tomado en diversos valores del argumento; y diversos valores de concentración para un solo valor del argumento. En esencia se puede establecer que, de acuerdo a lo anteriormente expuesto, cuando cesa el transporte transversal por gradiente de concentración, las concentraciones a lo ancho de la pluma (diversos valores para un mismo argumento) son aproximadamente convergentes con las concentración a lo largo (colección de valores para diversos para diversos). La primera concentración media se llama C_v y la segunda C_y .

$$\frac{M}{Q \square t_0} \square 0.441 \square C_p \quad (14)$$

El miembro de la izquierda es la concentración volumétrica mientras que el miembro de la derecha es la concentración a lo ancho. La determinación de cuando un soluto ha llenado uniformemente la sección transversal del flujo en el cual evoluciona es de vital importancia por dos razones principalmente: Una de carácter ambiental que tiene que ver con la clasificación de los cauces naturales para absorber o disipar las contaminaciones que lo impactan. Un flujo con una gran "Longitud de mezcla" (o sea la distancia a la cual se consigue "Mezcla completa") se verá más en peligro que otro que tenga esta longitud mucho más corta. Otra de carácter hidráulico que indica que la medición de caudal con trazadores será precisa solo cuando el trazador haya ocupado todo el volumen de flujo por el cual evoluciona; es decir, cuando el trazador alcanza "Mezcla completa". Datos del caudal con anterioridad a esta distancia estarán afectados de errores con diversa magnitud y sentido (Constain, Lemos y Carvajal, 2005).

APLICACIÓN DEL CRITERIO DE MEZCLA COMPLETA A VARIOS PROCESOS REALES DE EVOLUCION DE TRAZADOR.

Para ilustrar como se aplica la definición anterior para "Mezcla completa" es útil para varios propósitos prácticos en la técnica de trazadores, como se verá en seguida.

Analisis de una experimentación con trazador salino (NaCl) realizada con el equipo INIRIDA DEEP FLOW en el sur de Colombia (Rio Pance).

El Río Pance tiene las siguientes características:

Ubicación: Cali (Colombia), zona de los cerros occidentales

Tipo de cauce: Gran rio de montaña de gran pendiente, relativamente poco contaminado en el sitio de la medición.

Características hidráulicas: Gran caudal, velocidad significativa

Características de transporte de masa: Muy alta rugosidad superficial, inexistencia de piscinas.

Enseguida se muestran fotos del cauce y del equipo de medición a 400 metros del vertimiento. Figura 3.

Información grafica de los experimentos:

La gran ventaja para las mediciones es que se dispone de un equipo especial que trabaja un software (Inirida Deep Flow) en tiempo real. Este equipo cuenta con una pantalla que muestra la curva real de trazador y luego superpuesta la modelación teórica usando la ecuación (11). Además aparecen otras in-



Figura 3. Aspectos del Rio Pance y del instrumento de medición

formaciones como el cálculo del caudal usando la ley de conservación de la masa (con la integral bajo la curva). También se muestran datos numéricos como

U , Q y Φ entre otros. Se realizaron dos vertimientos con sal que se detallan en seguida.

Vertimiento 1 (X=400 m, M= 6 Kg). Figura 4

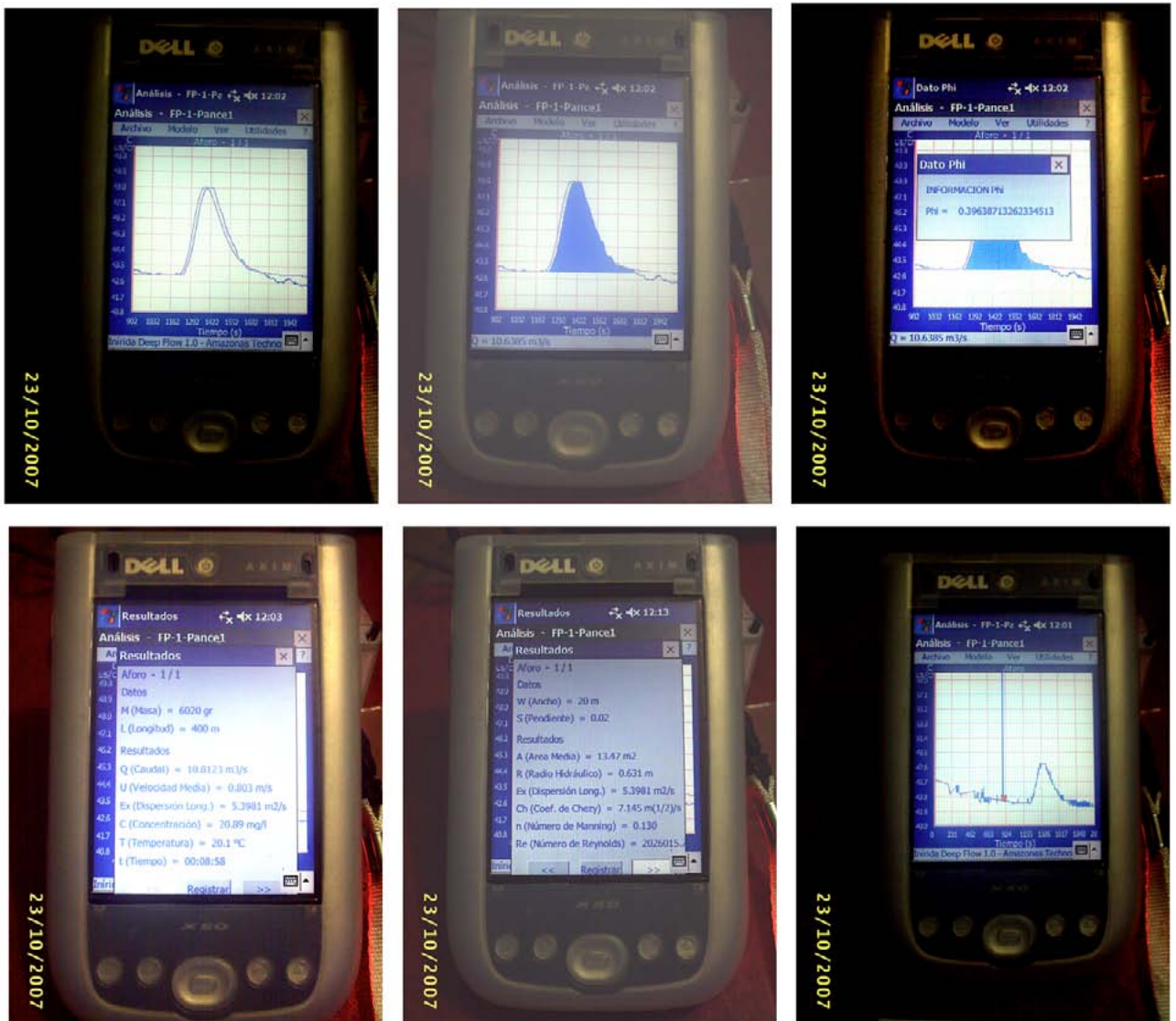


Figura 4. Pantallas del instrumento con datos gráficos y numéricos del 1er vertimiento

Vertimiento 2 (X=400 m, M=9 Kg). Figura 5.

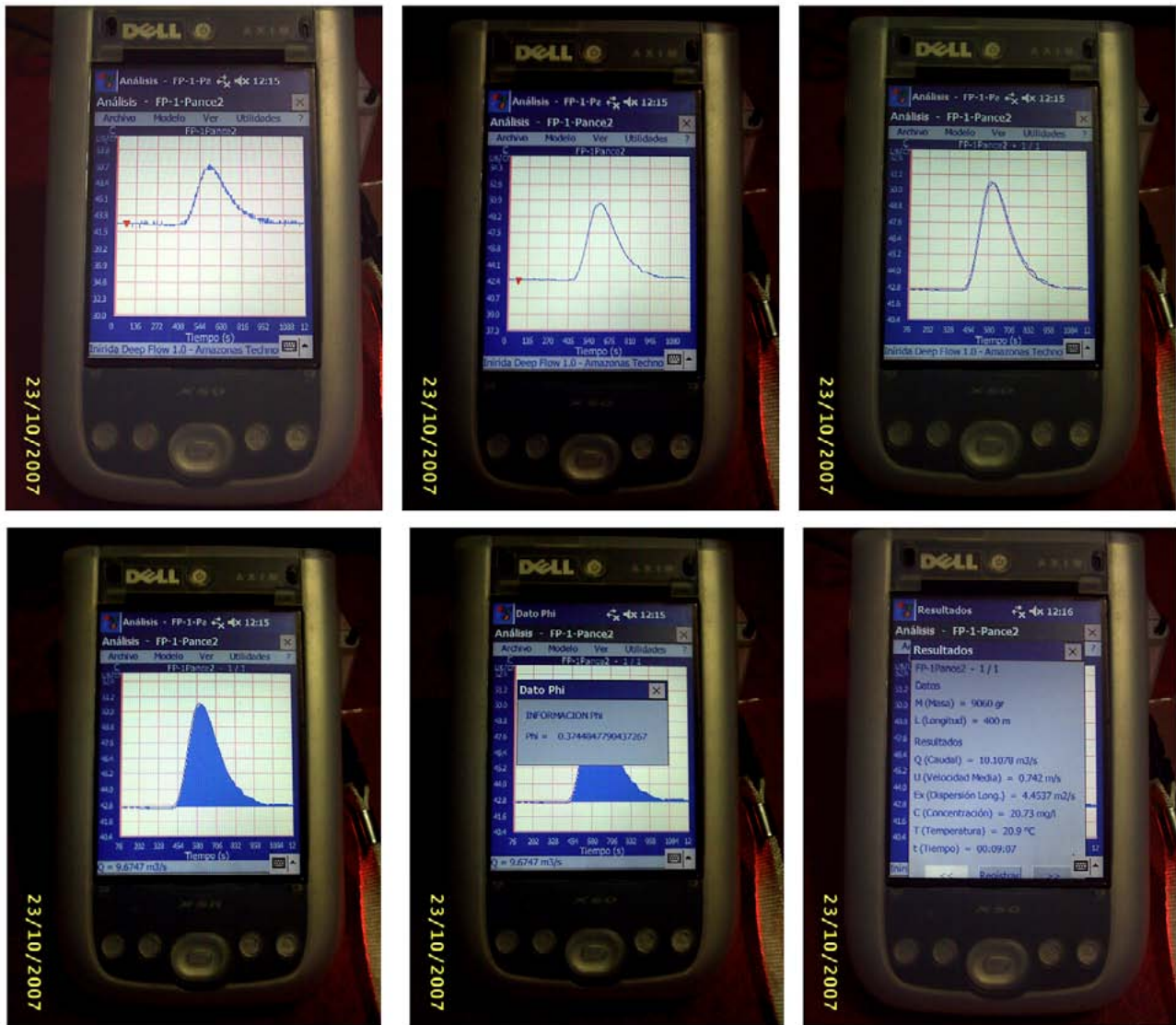


Figura 5. Pantallas del instrumento con datos gráficos y numéricos del 2o vertimiento

Cuadro de resultados numéricos.

El siguiente cuadro condensa las informaciones recogidas por el IDF en cada medición sobre el cauce en Sistema Internacional, utilizando unidades prácticas donde se marca (*):

| Vertimiento | Ancho, W M | Distancia, X M | Masa, M K | Velocidad Media, Ux M/s | Φ | Caudal, Q M3/s | Caudal, Qa (área bajo la curva) M3/s | Cp, Concentración pico Mgr/l(*) | to Tiempo S |
|-------------|---------------|-------------------|--------------|----------------------------|--------|-------------------|--|------------------------------------|-------------------|
| 1º. | 20 | 400 | 6.020 | 0.803 | 0.396 | 10.8 | 10.6 | 2.64 | 498 |
| 2º. | 20 | 400 | 9.060 | 0.742 | 0.374 | 10.1 | 9.7 | 3.88 | 539 |
| Promedio | 20 | 400 | ----- | 0.773 | 0.385 | 10.5 | 10.2 | ----- | ----- |

(*) Como se ve en la foto el dato original viene en conductividad específica. Se establece que la razón entre este parámetro en $\mu\text{S/cm}$ y concentración de soluto salino (NaCl) en miligramos/litro a 25°C es de 2.08

Análisis de los datos.

Enseguida se analizan los datos de cada uno de los vertimientos desde el punto de vista de las nuevas ecuaciones que soportan el IDF.

Primer vertimiento:

Se tiene un $\Phi = 0.396$ o sea prácticamente en “Longitud de mezcla” (exactamente esto ocurre en $\Phi = 0.38$) por lo tanto $Lm = 400\text{ m}$ en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador). Ahora bien, la condición de “mezcla completa” está acompañada de la convergencia de dos concentraciones promedias, Concentración volumétrica promedio y Concentración transversal promedio, de acuerdo con el Principio ergodico para distribuciones normales.

Para los datos del vertimiento No. 1 se tiene que:

$$\overline{C_v} = \frac{M}{Q \times t_o} = \frac{6020}{10800 \times 498} \approx 1.12\text{mgr/l}$$

$$\overline{C_y} = 0.441 \times C_p = 0.441 \times 2.64 \approx 1.16\text{mgr/l}$$

En este caso el principio ergodico $C_v \rightarrow C_y$ se realiza con una aproximación del 4%

Segundo vertimiento:

Se tiene un $\Phi = 0.374$ o sea prácticamente en “Longitud de mezcla” (exactamente esto ocurre en $\Phi = 0.38$) por lo tanto $Lm = 400\text{ m}$ en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador). Se repiten las consideraciones anteriores:

Para los datos del vertimiento No.2 se tiene que:

$$\overline{C_v} = \frac{M}{Q \times t_o} = \frac{9060}{10110 \times 539} \approx 1.66\text{mgr/l}$$

$$\overline{C_y} = 0.441 \times C_p = 0.441 \times 4.04 \approx 1.78\text{mgr/l}$$

En este caso el principio ergodico $C_v \rightarrow C_y$ se cumple con una aproximación del 7%

Análisis de una experimentación con trazador fluorimetrico (RWT) realizada con el equipo INIRIDA DEEP FLOW en el sur de Colombia (Rio Cali).

El Río Pance tiene las siguientes características:

Ubicación: Cali (V), zona occidental y central de la ciudad.

Tipo de cauce: Cauce de montaña de cierta pendiente, cauce contaminado en el sitio de la medición.

Características hidráulicas: Gran caudal, velocidad significativa

Características de transporte de masa: Rugosidad superficial media, existencia de piscinas

En seguida se muestran fotos del cauce y del experimento con Rodamina WT. Figura 6.

Información gráfica de los experimentos:

El equipo especial (Inirida Deep Flow) opera simultáneamente con dos sensores: de conductividad y de fluorescencia. En este caso. Se realizaron tres vertimientos de Rodamina WT que se detallan en seguida.



Figura 6. Aspectos del equipo de medición y del vertimiento del trazador

Vertimiento 1 (M= 10 g, X=613 m). Figura 7

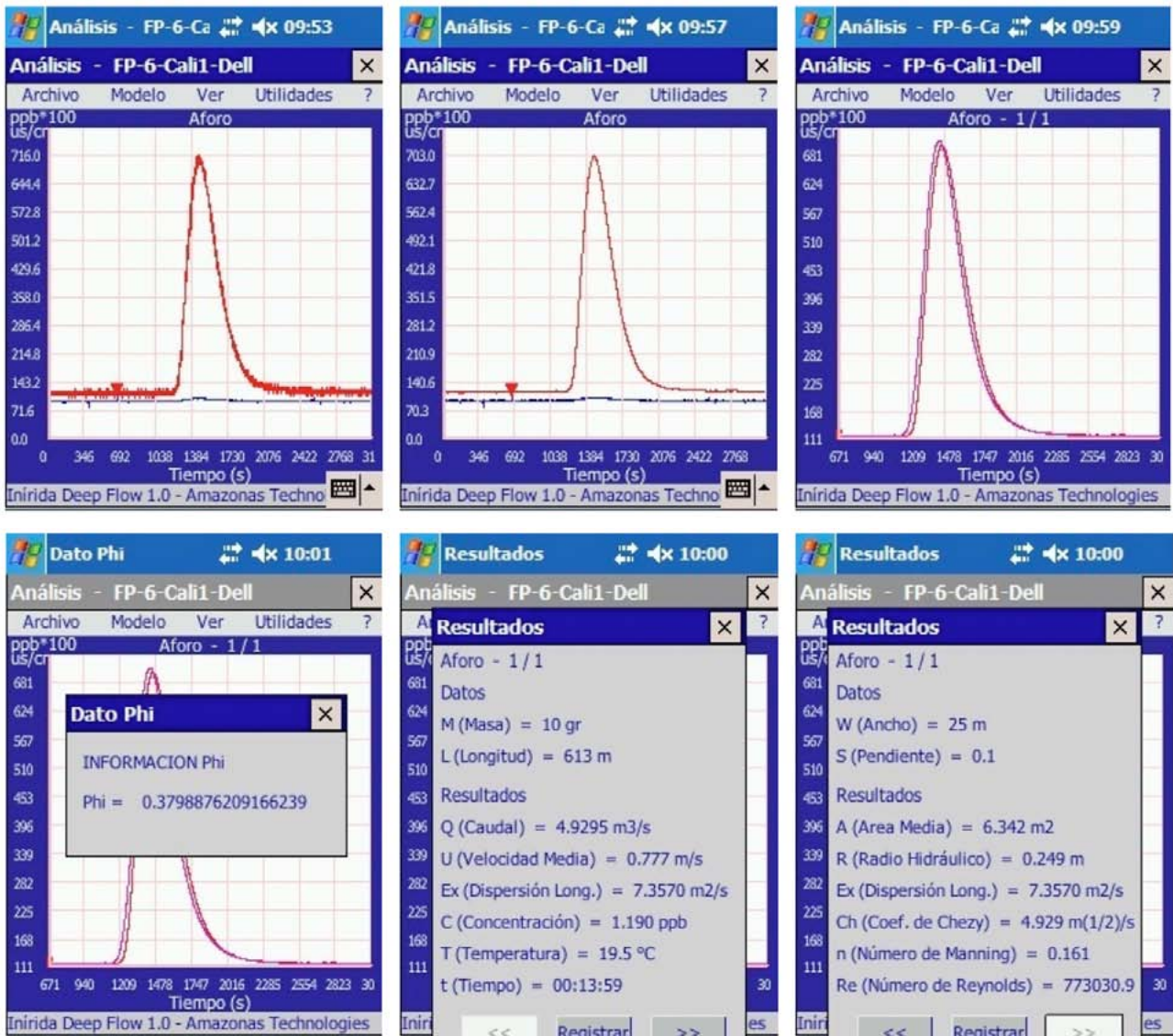


Figura 7. Pantallas con información grafica y numérica Primer vertimiento

Vertimiento 2 con Rodamina WT (M=4 g a X= 613 m) Figura 8

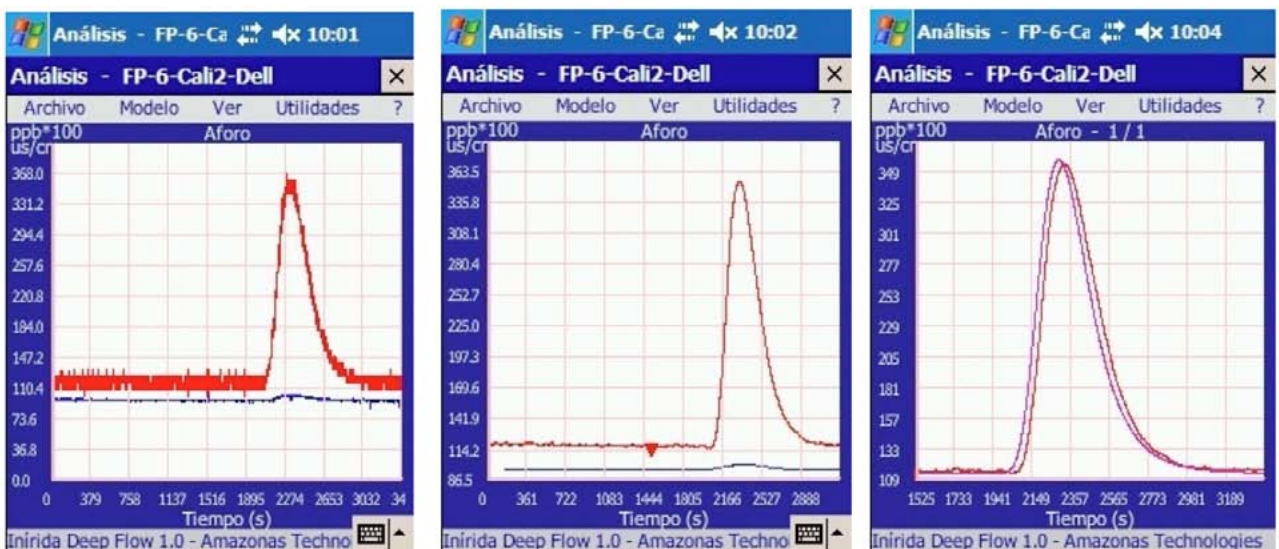


Figura 8. Pantallas con información grafica y numérica segundo vertimiento (parte A)



Figura 8. Pantallas con información grafica y numérica segundo vertimiento (parte B)

Vertimiento 3 con Rodamina WT (M=4 g a X= 613 m) Figura 9

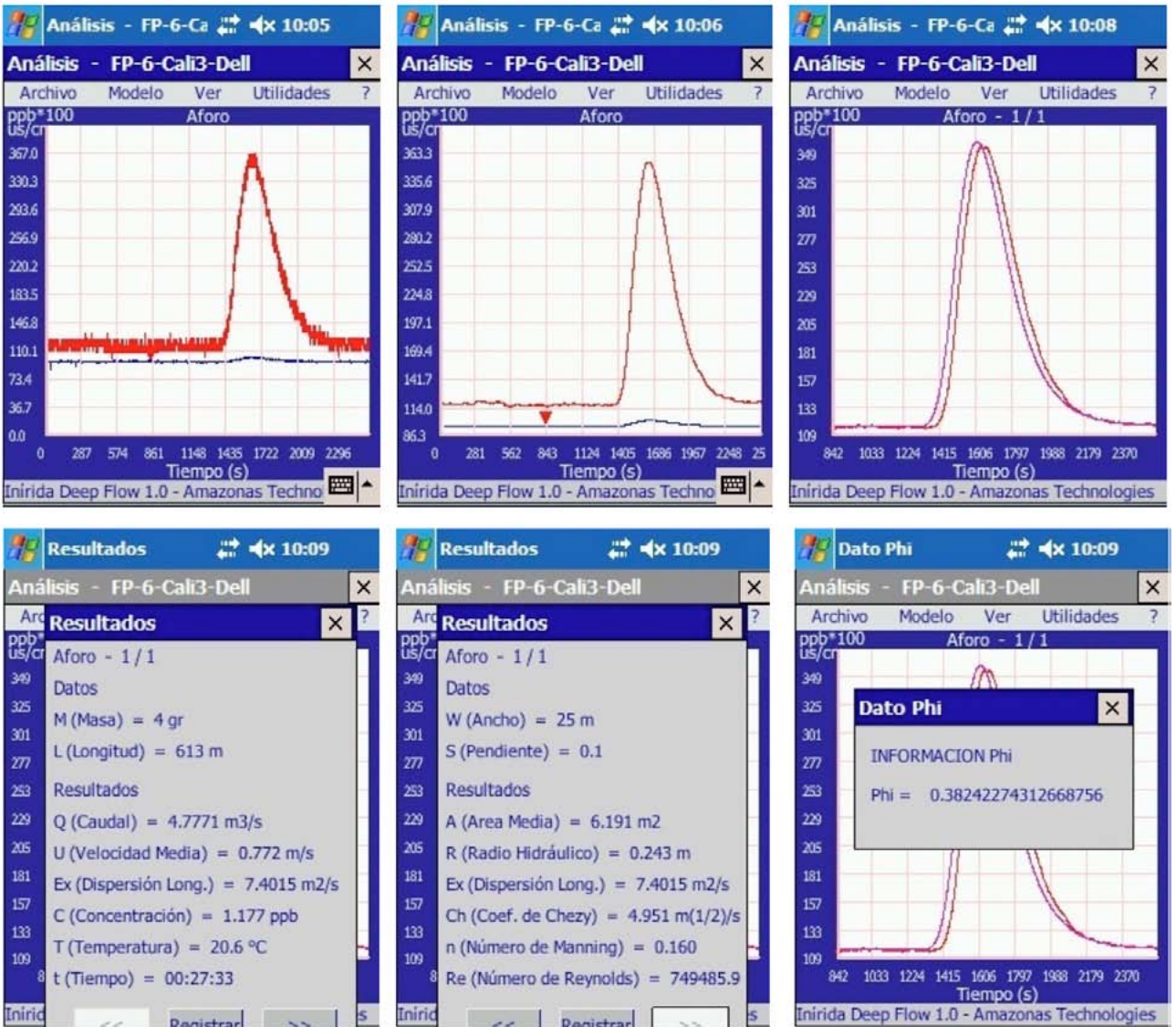


Figura 9. Pantallas con información grafica y numérica Tercer vertimiento

Cuadro de datos numéricos.

El siguiente cuadro condensa las informaciones recogidas por el IDF para las tres mediciones en el cauce en Sistema Internacional, utilizando unidades practicas donde se marca (*).

| Vertimiento | Ancho, W M | Distan- cia, X M | Masa, M G | Velocidad Media, Ux M/s | Φ | Caudal Q M3/s | Caudal Qa (área bajo la curva) M3/s | Cp, Con- centración pico Ppb (*) | Tiempo to S |
|-----------------|---------------|------------------------|-----------------|----------------------------------|--------|---------------------|---|---|-------------------|
| 1.- Rodamina WT | 25 | 613 | 10 | 0.78 | 0.38 | 4.93 | NA | 608.6 | 786 |
| 2.- Rodamina WT | 25 | 613 | 4 | 0.77 | 0.38 | 4.75 | NA | 248.0 | 796 |
| 3.- Rodamina WT | 25 | 613 | 4 | 0.77 | 0.38 | 4.77 | NA | 243.8 | 796 |
| Promedio | 25 | 613 | --- | 0.76 | 0.38 | ---- | ---- | ---- | 793 |

(*) Este dato en PPB está en grilla del instrumento multiplicado por 100 por lo tanto el valor real es cien veces menor

Análisis de los datos.

Primer vertimiento (10 g a 613 m)

Se tiene un $\Phi = 0.38$ o sea que se está en "Longitud de mezcla" (exactamente esto ocurre en $\Phi = 0.38$) por lo tanto $L_m = 613 m$ en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador. Por lo tanto:

$$\bar{C}_v = \frac{M}{Q \times t_o} \approx \frac{10}{4930 \times 786} \approx 2.58 \text{ ppb}$$

Y teniendo en cuenta que la grilla muestra *ppb* multiplicados por 100, se debe dividir por esa cifra para obtener el dato correcto

$$\bar{C}_y = 0.441 \times Cp_{Lm} \times \frac{1}{100} \approx 0.441 \times 608.6 \times \frac{1}{100} \approx 2.68 \text{ ppb}$$

Y por lo tanto se cumple bien el principio ergódico $C_v \rightarrow C_y$ para este caso con un error relativo del 4%:

Segundo vertimiento (M=4 g a X=613 m)

Se tiene un $\Phi = 0.38$ o sea que se está en "Longitud de mezcla" (exactamente esto ocurre en $\Phi = 0.38$) por lo tanto $L_m = 613 m$ en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador. Por lo tanto:

$$\bar{C}_v = \frac{M}{Q \times t_o} \approx \frac{4}{4750 \times 796} \approx 1.06 \text{ ppb},$$

Y teniendo en cuenta que la grilla muestra *ppb* multiplicados por 100, se debe dividir por esta cifra para obtener el dato correcto

$$\bar{C}_y = 0.441 \times Cp_{Lm} \times \frac{1}{100} \approx 0.441 \times 248 \times \frac{1}{100} \approx 1.09 \text{ ppb}$$

Y por lo tanto se cumple bien el principio ergódico $C_v \rightarrow C_y$ para este caso con un error relativo del 3%:

Tercer vertimiento (M=4 g a X=613 m)

Se tiene un $\Phi = 0.38$ o sea que se está en "Longitud de mezcla" (exactamente esto ocurre en $\Phi = 0.38$) por lo tanto $L_m = 613 m$ en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador. Por lo tanto:

$$\bar{C}_v = \frac{M}{Q \times t_o} \approx \frac{4}{4770 \times 796} \approx 1.05 \text{ ppb}$$

Y teniendo en cuenta que la grilla muestra *ppb* multiplicados por 100, se debe dividir por esta cifra para obtener el dato correcto

$$\bar{C}_y = 0.441 \times Cp_{Lm} \times \frac{1}{100} \approx 0.441 \times 248.8 \times \frac{1}{100} \approx 1.10 \text{ ppb}$$

Y por lo tanto se cumple bien el principio ergódico $C_v \rightarrow C_y$ para este caso con un error relativo del 5%.

CONCLUSIONES

1. La aplicación del principio ergódico en ambos tipos de trazador fue satisfactorio, y es claro que este criterio puede ser muy útil en el mo-

- mento de saber la información de la "Longitud de mezcla".
2. Este criterio es muy práctico y eficiente en el momento de realizar evaluaciones de calidad de aguas en los cauces naturales. .
 3. La metodología presentada se acopla muy bien a los datos experimentales, propiciando un análisis realista de los verdaderos mecanismos que condicionan el transporte de masa en los cauces naturales.
 4. Para facilitar la toma de información experimental se usa un equipo software-hardware (IDF) que opera en tiempo real, permitiendo una gran capacidad operativa a los grupos de trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- Constain A. 2012. Verification of Ergodic Principle for a dispersion process in flow. Aceptado Revista Aqualac, Montevideo, UNESCO.
- Constain, A., Carvajal. A., Carvajal, J., Lemos R. 2005. Nuevo método de cálculo de la Longitud de mezcla en cauces naturales usando trazadores conservativos. Revista Ingeniería del Agua, España, Vol.13 , No.3
- Constain A., Carvajal R., 2007. Accurate measurements of discharge using tracers, FLUCOME 9, University of Florida, Tallahassee. USA.
- Constain A. Carvajal. A., Lemos R. 2002. Applications of a non-uniform flow velocity in streams, River Flow 2002. Lovain- La-Neuve, Vol 1. 135-141
- Constain A.; Lemos R.; 2003.Carvajal A., "Tecnología IMHE: Nuevos desarrollos en la hidráulica". Revista Ingeniería Civil, CEDEX, Vol 129,
- Constain A., Carvajal. A., Lemos R. 2006. Determinación teórica del Coeficiente de tiempos β en la ecuación de velocidad de flujo no uniforme en cauces naturales, XII Congreso de Ingeniería Mecánica de Chile, Universidad de Talca, No.42
- Fischer H.B. 1968. Dispersion predictions in natural streams. Journal of the Sanitary Engineering Division. ASCE Proceedings, October. pp 927-943.
- French, R.,1986., Open Channel hydraulics, Mc Graw-Hill, New York, 461-507 N.Y.,
- Holley E.R. 1969. Unified view of diffusion and dispersion.Journal of Hydraulics Division, ASCE proceedings, March, pp 621-631.
- Lande A., 1968. Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica. Editorial Tecnos.Madrid.
- Prigogine I.; 1998. Kondepudi D.; Modern Thermodynamics. Wiley, New York,

HUELLA HÍDRICA DE AMÉRICA LATINA: RETOS Y OPORTUNIDADES LATIN AMERICA'S WATER FOOTPRINT: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Rita Vázquez del Mercado Arribas¹, Mario Óscar Buenfil Rodríguez²

Resumen

Los conceptos de agua virtual y de huella hídrica -introducidos en 1998 y 2002 respectivamente-, parecen apuntar a un cambio de paradigma en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y en las políticas hídricas, agropecuarias y comerciales en todo el mundo. Su estudio ayuda a identificar cómo y dónde, el consumo en un lugar, impacta los recursos hídricos de otro lugar. La huella hídrica indica, además del volumen de agua dulce empleado directa e indirectamente para producir un bien, el lugar preciso donde se obtuvo dicho volumen, especificando si se trató de agua verde o azul, la contaminación que generó y el lugar en que se consumió ese bien finalmente. De esta forma, permite visualizar patrones y tendencias de uso del agua, -que tradicionalmente no eran tomados en cuenta-, relacionándolos con los flujos de comercio de agua virtual. En el período 1996-2005, América Latina presentó grandes contrastes. Argentina y Brasil fueron los grandes exportadores de agua virtual de la región, ocupando además el segundo y quinto lugar en el mundo respectivamente. Por otro lado, México fue el principal importador de agua virtual de la región, ocupando además el segundo lugar en el mundo, superado únicamente por Japón. Su dependencia hídrica del exterior fue de 42.5%, cuando el promedio mundial fue de 21.7%. Aunque ciertamente el comercio de agua virtual constituye para México un "ahorro" de agua, que le permite preservar de mejor manera sus escasos recursos hídricos, esto es a costa de una menor soberanía alimentaria. Otros países de la región que tienen una dependencia hídrica superior al promedio global son: Chile, Costa Rica, El Salvador, Panamá, Perú, República Dominicana y Venezuela. Es importante que todos estos países estudien con detalle la relación entre sus recursos hídricos, sus políticas y su comercio. En cuanto a la huella hídrica del consumo nacional, la región concentró durante el periodo 1996-2005, el 10.5% de la huella hídrica global con el 8.2% de la población mundial. El volumen de la correspondiente a Brasil y a México equivalió al 6.5% de la huella hídrica global. Por lo que respecta a la huella hídrica del consumo nacional per cápita, la huella hídrica de la región fue 29% superior a la global. El principal reto para reducirla será cambiar hábitos de consumo, tanto de agua como de bienes y productos en general y establecer mejores prácticas y tecnologías que permitan un uso más eficiente de agua, especialmente en Bolivia, Uruguay, Brasil, Ecuador, México y Paraguay. La educación ambiental e hídrica tendrá un papel determinante. Aunque creciente, el número de estudios y especialistas en el tema de huella hídrica en América Latina es muy limitado. Una mejor comprensión del tema puede ayudar a las naciones de la región a mejorar su toma de decisiones de política hídrica, agrícola y comercial y a promover un mejor uso del agua, nacional, regional y global.

Palabras clave: Huella hídrica. Agua virtual. Comercio de agua virtual. América Latina. Soberanía alimentaria.

Abstract

The concepts of virtual water and water footprint -introduced in 1998 and 2002 respectively-, seem to point out to a paradigm shift in Integrated Water Resources Management and in water, agricultural and trade policies around the world. Their study helps to identify how and where, the consumption in one place, impacts water resources somewhere else. Besides indicating the volume of fresh water used directly and indirectly to produce a good, the water footprint points out the place from which this volume was obtained and specifies if it was green or blue water, the pollution generated and the place where that good was finally consumed. In this way, it allows to visualize patterns and trends of water use, -which traditionally were not taken into account-, relating them with virtual water trade flows. In the 1996-2005 period, Latin America presented great contrasts. Argentina and Brazil were the major exporters of virtual water in the region, having as well the second and fifth place in the world respectively. On the other hand, Mexico was the main importer of virtual water in the region, and the second in the world, surpassed only by Japan. Its external water dependence was 42.5%, when the global average was 21.7%. Although certainly virtual water trade constitutes water "saving" for Mexico, allowing it to better preserve its scarce water resources, this is at the expense of lower food sovereignty. Other countries in the region presenting above-global average external water dependence were: Chile, Costa Rica, El Salvador, Panama, Peru, Dominican Republic and Venezuela. It is important for all these countries to study in depth the relationship between their water resources, policies and trade. As for the water footprint of national consumption, the region concentrated during the period 1996-2005, 10.5% of the global water footprint with the 8.2% of the world's population. The volume corresponding to Brazil and Mexico was equivalent to 6.5% of the global water footprint. With regard to the water footprint of national consumption per capita, the water footprint in the region was 29% higher than the global average. The main challenge to reduce it will be to change

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, rvazquez@tlaloc.imta.mx, +52 777 329 3600

² Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, mbuenfil@tlaloc.imta.mx, +52 777 329 3600

Artículo enviado el 30 de mayo de 2012

Artículo aceptado el 5 de noviembre de 2012

consumption habits of water, goods and products, and to establish best practices and technologies allowing a more efficient use of water, especially in Bolivia, Uruguay, Brazil, Ecuador, Mexico and Paraguay. Water and environmental education will play a decisive role. Though increasing, the number of studies and experts on water footprint in Latin America is very limited. A better understanding of this topic can help the Nations of the region to improve its decision-making for water, agricultural and trade policies and to promote a better national, regional and global use of water.

Keywords: Water footprint. Virtual water. Virtual water trade. Latin America. Food sovereignty.

INTRODUCCIÓN

Los conceptos de agua virtual y de huella hídrica introducidos en 1998 y 2002 respectivamente, parecen apuntar a un cambio de paradigma en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y en las políticas hídricas, agropecuarias y comerciales en todo el mundo. Tradicionalmente se ha considerado al agua como un recurso nacional, o, en el caso de cuencas compartidas, internacional, pero difícilmente se reconoce al agua como un recurso global. Incluso se recomienda, para una buena gobernanza, que las decisiones de asignación de los recursos hídricos sean tomadas al nivel apropiado más bajo, atendiendo al principio de subsidiariedad. Los especialistas en recursos hídricos usualmente abordan la demanda de agua en función de las necesidades de los usuarios de la región de que se trate, sin tomar en cuenta la demanda de productos de exportación. Por otro lado, los economistas usualmente no consideran las implicaciones del comercio internacional para el sector agua. No obstante, el intenso comercio de agua virtual y sus consecuencias, tanto en los países exportadores como en los importadores, nos llevan a reflexionar sobre la importancia de estudiar más a fondo la relación entre el comercio de agua virtual, la escasez de agua y la soberanía alimentaria.

Es un hecho que grandes volúmenes de agua se emplean y contaminan para producir bienes de exportación. Sin embargo, las reglas del comercio internacional no toman en cuenta el uso sostenible del agua en los países productores, bajo el principio de "no discriminación", entre productos similares. El comercio de agua virtual, a través de productos con altos requerimientos hídricos, no sólo genera un importante consumo de agua en los países exportadores, sino que además tiene una serie de costos sociales y ambientales que muchas veces se pasan por alto y no se reflejan en el precio que pagan los países importadores. Por otro lado, para los países importadores, el comercio de agua virtual constituye un "ahorro" de agua, que no tuvieron que utilizar para obtener los bienes en cuestión, a costa de una mayor dependencia del exterior y una menor soberanía alimentaria. Esto último puede ser inevitable en el caso de naciones con insuficientes recursos hídricos.

La buena noticia es que el comercio internacional puede ayudar a conseguir un uso más eficiente del agua a escala global, si se exportan bienes de altos requerimientos hídricos de una nación con alta productividad hídrica (menor volumen de agua por tonelada de producto), a una nación con menor productividad. Según un estudio sobre la huella hídrica

de la humanidad (Hoekstra y Mekonnen, 2012), la producción agrícola contribuyó en un 92% a la huella hídrica total en el período 1996-2005. Una quinta parte de dicha producción estuvo destinada a la exportación. El volumen global de "ahorro" de agua debido al comercio de agua virtual de productos agrícolas fue equivalente al 4% de la huella hídrica global de la producción agrícola.

CONCEPTOS

Dado que se trata de términos relativamente nuevos, a continuación se presentan algunas definiciones básicas, consistentes con las propuestas por la Red de la Huella Hídrica en el manual "*The water footprint assessment manual: Setting the global standard*" (Hoekstra *et al*, 2011), para después hacer algunas reflexiones y revisar la huella hídrica de los países de América Latina.

Agua virtual es el volumen total de agua utilizada directa e indirectamente para la elaboración de un producto. Este concepto fue introducido en 1998 por Tony Allan -galardonado con el Premio del Agua de Estocolmo en 2008 por esta innovación-, en su publicación sobre los problemas de escasez de agua en el Medio Este: "*Virtual Water: A Strategic Resource, Global Solutions to Regional Deficits*" (Allan, 1998).

Huella hídrica es un concepto introducido en 2002 por Arjen Hoekstra y P. Hung, como un indicador que pudiera mapear el impacto del consumo humano de agua dulce. Puede referirse a un producto, a un consumidor, a una empresa, a una región o a una nación. La huella hídrica total, se compone de la huella hídrica verde, azul y gris.

Huella hídrica verde es el volumen de agua de lluvia evaporado o incorporado al producto durante el proceso de producción. Esto es particularmente relevante para los productos agrícolas y forestales (productos a base de cultivos o de madera) y se refiere a la evapotranspiración del agua de lluvia total (de los campos y de las plantaciones), así como al agua incorporada a la cosecha o a la madera.

Huella hídrica azul es el volumen de agua superficial y subterránea evaporado, incorporado al producto o devuelto a otra cuenca o al mar, como resultado de la producción de un bien o servicio. También incluye el agua extraída de una cuenca y descargada en otra o en el mar. Es la cantidad de agua extraída, superficial o subterránea, que no vuelve a la cuenca de la que fue retirada.

Huella hídrica gris es un indicador de la contaminación del agua dulce que puede estar asociada con la

fabricación de un producto y con su cadena de suministro. Se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes hasta llegar a concentraciones que cumplan con normas de calidad de agua. Se calcula como el volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes hasta el punto en que la calidad del agua se mantenga por encima de las normas acordadas de calidad del agua. La huella hídrica gris ha generado mucha polémica debido a que no es un volumen que se emplee en realidad para diluir la carga contaminante y a que su cálculo se basa en el contaminante más crítico.

La distinción entre el agua verde y el agua azul fue introducida en 1995 (Falkenmark, 1995). La huella hídrica gris es un concepto aún más reciente, utilizado por primera vez en 2008 (Hoekstra y Chapagain, 2008).

Como un indicador de "uso del agua", la huella hídrica se diferencia de la medida clásica de "extracción de agua" en tres aspectos:

1. No incluye el uso del agua azul, en la medida en que esta agua se devuelva a donde vino.
2. No se limita al uso del agua azul, sino que también incluye al agua verde y gris.
3. No se limita al uso directo de agua, sino que también incluye el uso indirecto.

Huella hídrica de un producto, bien o servicio, es el volumen total de agua dulce utilizado para su elaboración, sumado en las diversas etapas de la cadena productiva. La huella hídrica de un producto no sólo se refiere al volumen total de agua utilizada, sino que también hace referencia a dónde y cuándo se utiliza el agua, por lo que tiene una dimensión volumétrica, espacial y temporal.

Huella hídrica de un cultivo es el volumen de agua utilizado en el cultivo (m^3/ha) dividido entre su rendimiento (ton/ha). El uso de agua del cultivo depende, por un lado, de su necesidad de agua y por el otro, del agua disponible en el suelo. Cuando un cultivo primario se transforma en un producto (por ejemplo, arroz procesado como arroz integral), la huella hídrica del producto transformado se calcula dividiendo la huella hídrica de los productos primarios entre la denominada fracción del producto (es decir, el tonelaje del producto vegetal obtenido por tonelada del cultivo primario). Si un cultivo primario se transforma en dos productos distintos o más (por ejemplo, algodón procesado como textil y como aceite de algodón), es necesario distribuir la huella hídrica del cultivo principal entre sus productos, en proporción al valor de los mismos.

Huella hídrica de las naciones es un indicador que se puede referir al *consumo* nacional o a la *producción* nacional. La **huella hídrica del consumo nacional** se define como la cantidad total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por los habitantes de una nación. Se compone de: 1) la **huella hídrica interna del con-**

sumo nacional, que es la que impacta y se genera dentro de la nación, es decir, es la apropiación de los recursos hídricos nacionales para la producción de bienes y servicios que se consumen en el país y 2) la **huella hídrica externa del consumo nacional**, que impacta y se produce fuera de la nación. Se refiere a la apropiación de los recursos hídricos en otras naciones para la producción de bienes y servicios que se importan y consumen en el país considerado. Así, la huella hídrica del consumo nacional es igual a la huella hídrica interna, más la importación de agua virtual, menos la exportación de agua virtual. Por otro lado, la **huella hídrica de la producción nacional** es la suma de la huella hídrica interna del consumo nacional, más la exportación de agua virtual, es decir, el volumen de agua empleado en ese país para producir bienes y productos, tanto para consumo interno como para exportación. La diferencia entre la huella hídrica de la producción nacional y la huella hídrica del consumo nacional nos indica si un país es exportador o importador neto de agua virtual.

METODOLOGÍA

Con objeto de visualizar con mayor claridad la huella hídrica de los países de América Latina, se hizo un análisis comparativo simple de los flujos de agua virtual y de la huella hídrica del consumo nacional (total y *per cápita*), de estos países, empleando datos extraídos de estudios recientes de la Red de la Huella Hídrica: *The waterfootprint of humanity* (Hoekstra y Mekonnen, 2012) y los Apéndices II, VIII y IX de *National waterfootprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption* (Mekonnen y Hoekstra, 2011). A su vez, dichos estudios se basan en las estadísticas de Suministro y Utilización de Alimentos, por el período 1996-2005, publicadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAOSTAT), en datos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y en datos del Centro para la Red Internacional de Información de Ciencias de la Tierra (CIESIN). La metodología empleada fue la establecida en el estándar global para la evaluación de la huella hídrica (Hoekstra *et al*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Huella hídrica de América Latina

En la Figura 1 se muestran los flujos de agua virtual en el mundo, relacionados con el comercio agrícola e industrial, superiores a los 15 mil millones de $m^3/año$ (Gm^3). El grosor de las flechas indica la magnitud del volumen. Se puede apreciar que en América Latina solamente dos países exportan un flujo de agua virtual superior a la cifra mencionada: Argentina (hacia Brasil) y México (hacia Estados Unidos). Sin embargo, México a su vez importa un volumen muy superior al que exporta, siendo el mayor importador neto de agua virtual de la región y el segundo del mundo, su-

perado únicamente por Japón (Mekonnen y Hoekstra, 2011, Apéndice II).

En la Figura 2 podemos observar el detalle del flujo de agua virtual por comercio agrícola, ganadero e industrial de los países de América Latina. Destacan como grandes exportadores Argentina y Brasil, especialmente en cuanto a comercio agrícola y ganadero. A nivel mundial, Argentina es el segundo exportador de agua virtual, superado únicamente

por India, mientras que Brasil ocupa el quinto lugar. Por otro lado, México destaca como gran importador de agua virtual en comercio agrícola, ganadero e industrial, ocupando además el segundo lugar en el mundo, superado únicamente por Japón. Su dependencia hídrica del exterior es de 42.5%, cuando el promedio mundial es de 21.7%, como se muestra en la Tabla 1.

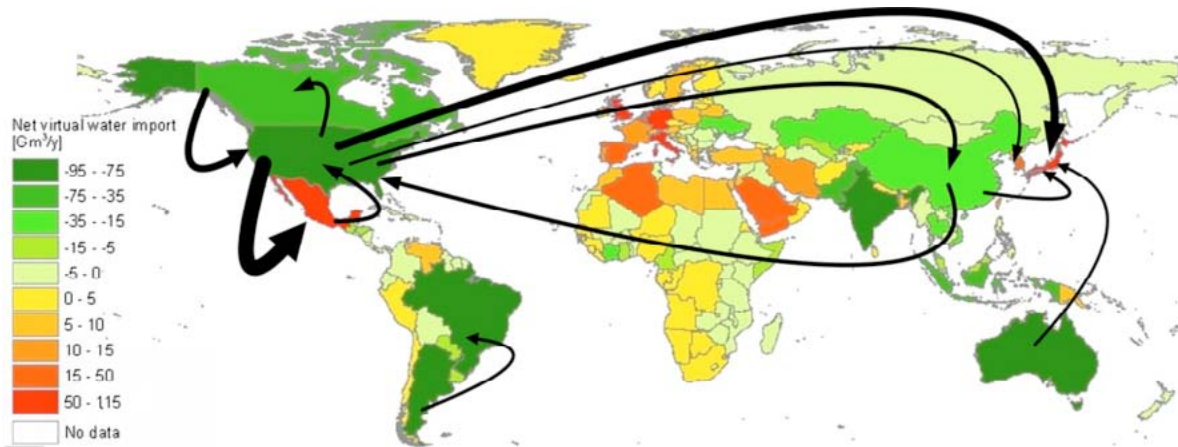


Figura 1.-Balance de agua virtual por país y dirección del flujo virtual bruto, relacionado con el comercio agrícola e industrial, en el periodo 1996-2005 (Hoekstra y Mekonnen, 2012).

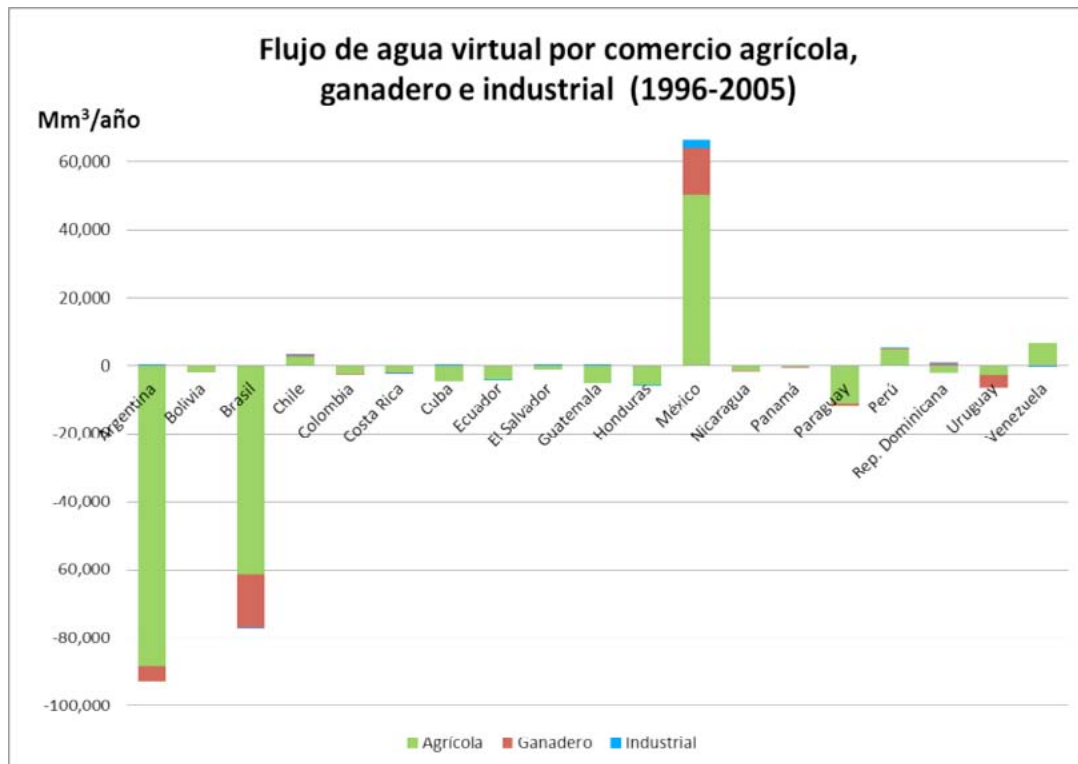


Figura2.- Flujo de agua virtual por comercio agrícola, ganadero e industrial en América Latina. Gráfica elaborada por los autores con datos de Mekonnen y Hoekstra, 2011, Apéndice II.

En la Figura 3 se muestran los mismos datos, pero sin Argentina, Brasil y México, a fin de observar en mejor escala los flujos menores de agua virtual del resto de los países, destacando Paraguay, Uruguay y Honduras como exportadores y Venezuela, Perú y Chile como importadores.

Como se muestra en la Tabla 1 y según datos de Mekonnen y Hoekstra (2011, Apéndices VIII y IX),

en el período 1996-2005, los países de América Latina representaron el 10.5% de la huella hídrica del consumo nacional global, mientras que su población representó el 8.2% del total, siendo Brasil y México quienes mayor huella hídrica presentaron, equivalente al 6.5% del total global. Panamá, Nicaragua y Costa Rica reportaron la menor huella hídrica del consumo nacional.

| Huella hídrica del consumo nacional 1996-2005 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---------|-----------|-----------|---|---------|---------|-----------|---|---------|-----------|-----------|-------------------|---------------------------|------------------------|---------------|
| País | Huella hídrica interna (Mm ³) | | | | Huella hídrica externa (Mm ³) | | | | Huella hídrica total (Mm ³) | | | | % Externa / Total | Per cápita | | % Pob mundial |
| | Verde | Azul | Gris | Total | Verde | Azul | Gris | Total | Verde | Azul | Gris | TOTAL | | Mm ³ /año /hab | Millones de habitantes | |
| Argentina | 47.746 | 3.865 | 5.662 | 57.273 | 1.298 | 207 | 768 | 2.273 | 49.044 | 4.072 | 6.430 | 59.546 | 3.8 | 1.607 | 37.060 | 0.6 |
| Bolivia | 25.764 | 399 | 245 | 26.408 | 2.489 | 128 | 136 | 2.753 | 28.253 | 527 | 381 | 29.161 | 9.4 | 3.468 | 8.409 | 0.1 |
| Brasil | 288.345 | 10.120 | 24.109 | 322.574 | 27.981 | 2.222 | 2.597 | 32.799 | 316.326 | 12.342 | 26.706 | 355.374 | 9.2 | 2.027 | 175.308 | 2.8 |
| Chile | 6.994 | 2.336 | 2.580 | 11.910 | 5.071 | 310 | 597 | 5.978 | 12.065 | 2.646 | 3.177 | 17.888 | 33.4 | 1.155 | 15.492 | 0.3 |
| Colombia | 35.863 | 1.923 | 6.366 | 44.151 | 9.101 | 749 | 1.122 | 10.972 | 44.964 | 2.671 | 7.488 | 55.123 | 19.9 | 1.375 | 40.094 | 0.7 |
| Costa Rica | 2.725 | 240 | 1.098 | 4.063 | 1.381 | 197 | 265 | 1.843 | 4.106 | 437 | 1.363 | 5.906 | 31.2 | 1.490 | 3.963 | 0.1 |
| Cuba | 13.194 | 1.033 | 1.991 | 16.218 | 1.944 | 139 | 411 | 2.494 | 15.138 | 1.172 | 2.402 | 18.712 | 13.3 | 1.687 | 11.091 | 0.2 |
| Ecuador | 17.175 | 1.685 | 3.028 | 21.888 | 2.464 | 146 | 322 | 2.932 | 19.639 | 1.831 | 3.350 | 24.820 | 11.8 | 2.007 | 12.368 | 0.2 |
| El Salvador | 3.441 | 81 | 686 | 4.208 | 1.482 | 222 | 225 | 1.929 | 4.923 | 303 | 911 | 6.138 | 31.4 | 1.032 | 5.945 | 0.1 |
| Guatemala | 8.137 | 172 | 785 | 9.093 | 1.553 | 215 | 354 | 2.122 | 9.689 | 386 | 1.139 | 11.215 | 18.9 | 983 | 11.412 | 0.2 |
| Honduras | 5.754 | 122 | 450 | 6.326 | 777 | 176 | 138 | 1.091 | 6.531 | 299 | 588 | 7.417 | 14.7 | 1.177 | 6.299 | 0.1 |
| México | 83.841 | 10.148 | 19.492 | 113.481 | 65.986 | 8.833 | 9.125 | 83.944 | 149.827 | 18.981 | 28.617 | 197.425 | 42.5 | 1.978 | 99.810 | 1.6 |
| Nicaragua | 3.498 | 155 | 276 | 3.928 | 536 | 103 | 107 | 746 | 4.035 | 258 | 382 | 4.675 | 16.0 | 912 | 5.125 | 0.1 |
| Panamá | 2.226 | 111 | 484 | 2.821 | 928 | 103 | 211 | 1.242 | 3.154 | 214 | 695 | 4.063 | 30.6 | 1.364 | 2.979 | 0.0 |
| Paraguay | 9.673 | 226 | 360 | 10.259 | 141 | 66 | 99 | 306 | 9.814 | 292 | 459 | 10.565 | 2.9 | 1.954 | 5.407 | 0.1 |
| Perú | 13.142 | 3.542 | 2.541 | 19.225 | 8.050 | 422 | 763 | 9.235 | 21.192 | 3.964 | 3.304 | 28.460 | 32.4 | 1.088 | 26.158 | 0.4 |
| Rep. Dom. | 6.590 | 937 | 942 | 8.469 | 3.263 | 224 | 516 | 4.003 | 9.853 | 1.161 | 1.458 | 12.472 | 32.1 | 1.401 | 8.901 | 0.1 |
| Uruguay | 5.184 | 186 | 233 | 5.603 | 1.286 | 21 | 142 | 1.449 | 6.469 | 208 | 376 | 7.053 | 20.5 | 2.133 | 3.307 | 0.1 |
| Venezuela | 21.551 | 1.591 | 4.546 | 27.688 | 12.985 | 569 | 901 | 14.454 | 34.535 | 2.160 | 5.447 | 42.142 | 34.3 | 1.710 | 24.640 | 0.4 |
| América Latina | 600.842 | 38.871 | 75.874 | 715.588 | 148.714 | 15.054 | 18.797 | 182.566 | 749.556 | 53.926 | 94.671 | 898.153 | 20.3 | 1.783 | 503.767 | 8.2 |
| % AL / Total mundial | 12.3 | 5.4 | 7.2 | 10.7 | 11.0 | 6.9 | 6.6 | 9.9 | 12.0 | 5.7 | 7.1 | 10.5 | --- | 129 | 8.2 | 8.2 |
| Total mundial | 4.902.626 | 724.848 | 1.049.238 | 6.676.713 | 1.346.911 | 218.476 | 282.964 | 1.848.351 | 6.249.537 | 943.325 | 1.332.202 | 8.525.064 | 21.7 | 1.385 | 6.154.564 | 100.0 |

Tabla 1.- Huella hídrica del consumo nacional 1996-2005, total y per cápita, elaborada con datos de Mekonnen, M.M. y Hoekstra, 2011, Apéndices VIII y IX.

En cuanto a la huella hídrica del consumo nacional *per cápita*, Bolivia, Uruguay y Brasil presentaron las mayores cifras. Es de resaltar el caso de Bolivia, que si bien tiene una huella esencialmente verde, fue el país con mayor huella hídrica *per cápita* de la región: 3,468 m³/año/hab además ocupó el tercer lugar a nivel mundial, por encima incluso de los Estados Unidos de América -que ocupó el octavo lugar con 2,842 m³/año/hab-, y superada únicamente por Mongolia y Níger, que reportan 3,775 y 3,519 m³/año/hab respectivamente. Esto se explica en parte debido a que el consumo de carne en Bolivia es 1.3 veces el promedio de consumo de carne global, pero su productividad para producir carne es cinco veces la del

promedio mundial (Hoekstra y Mekonnen, 2012). Por otro lado, estas cifras son resultado de la carencia de tecnología eficiente y posiblemente de estadísticas no confiables, por lo que resulta importante corroborar esta información.

Los países de la región con menor huella hídrica de consumo nacional *per cápita* fueron: Nicaragua, Guatemala y El Salvador. El promedio mundial fue de 1,385 m³/año/hab y se relacionó en un 92% con productos agrícolas. El promedio de América Latina fue de 1,783 m³/año/hab. República Dominicana, Costa Rica, Argentina, Cuba y Venezuela, estuvieron por encima del promedio mundial. Paraguay, México, Ecuador, Brasil, Uruguay y Bo-

livia, estuvieron por encima del promedio mundial y del regional. En cuanto a la composición de la huella hídrica del consumo nacional *per cápita*, también se presentaron diferencias notables, que se aprecian en

la Figura 4, siendo Costa Rica, México y Panamá, los países con mayor huella hídrica gris, mientras que Bolivia, Nicaragua y Paraguay reportaron la menor de la región.

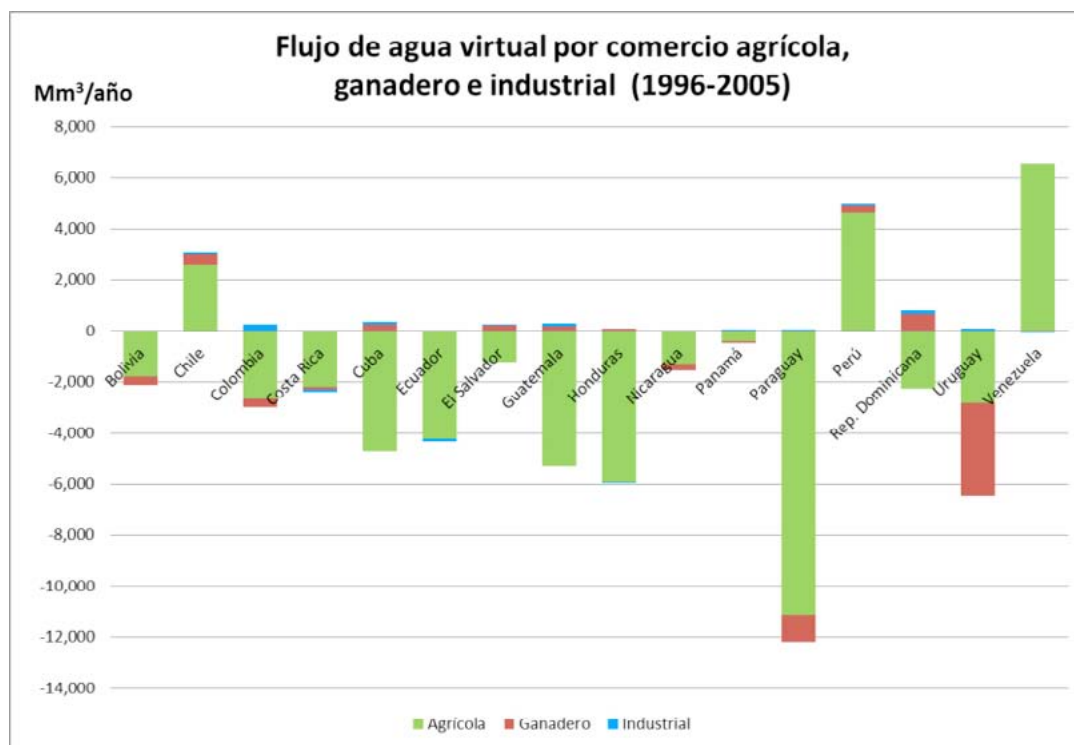


Figura 3.- Flujo de agua virtual por comercio agrícola, ganadero e industrial en América Latina, sin considerar a Brasil, Argentina y México. Gráfica elaborada por los autores con datos de Mekonnen y Hoekstra, 2011, Apéndice II.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Indudablemente el comercio de agua virtual afecta de manera importante la disponibilidad de recursos hídricos de los países, ya sea incrementándola, en el caso de los países importadores, o reduciéndola, en el caso de los países exportadores. Sin embargo, usualmente no se toma en cuenta en la planeación hídrica. La perspectiva local, nacional o de cuenca, en la gestión integrada de recursos hídricos (principio de subsidiariedad), en muchos casos puede no ser suficiente debido a que muchos problemas hídricos, como la sobre explotación y la contaminación, están estrechamente vinculados al comercio internacional. El intenso comercio de agua virtual y sus consecuencias, tanto en los países exportadores como en los importadores, nos llevan a reflexionar sobre la importancia de estudiar más a fondo la tendencia y la relación entre el comercio de agua virtual, la escasez de agua y la soberanía alimentaria.

América Latina presenta grandes contrastes en cuanto a huella hídrica y comercio de agua virtual. Argentina y Brasil son los grandes exportadores de agua virtual de la región, especialmente en cuanto a comercio agrícola y ganadero, ocupando además el segundo y quinto lugar en el mundo respectiva-

mente. Si bien su dependencia hídrica del exterior es mínima (3.8 y 9.2%), habría que considerar detenidamente en planes y políticas hídricas, agrícolas y comerciales, los costos ambientales de su comercio de agua virtual. Por otro lado, México es el principal importador de agua virtual de la región en comercio agrícola, ganadero e industrial, ocupando además el segundo lugar en el mundo, superado únicamente por Japón. Su dependencia hídrica del exterior es de 42.5%, cuando el promedio mundial es de 21.7%. Aunque ciertamente el comercio de agua virtual constituye para México un “ahorro” de agua, que le permite preservar de mejor manera sus escasos recursos hídricos, esto es a costa de una menor soberanía alimentaria. Otros países de la región que tienen una dependencia hídrica superior al promedio global son Chile, Costa Rica, El Salvador, Panamá, Perú, República Dominicana y Venezuela. Es importante que todos estos países revisen con detalle la relación entre sus recursos hídricos, su soberanía alimentaria, sus políticas y su comercio internacional, procurando diversificar el origen de sus importaciones, para reducir el riesgo por crisis y vaivenes frecuentes (cuestiones económicas, desastres naturales, cambio climático, etc.), que pudiera poner en peligro su seguridad alimentaria.

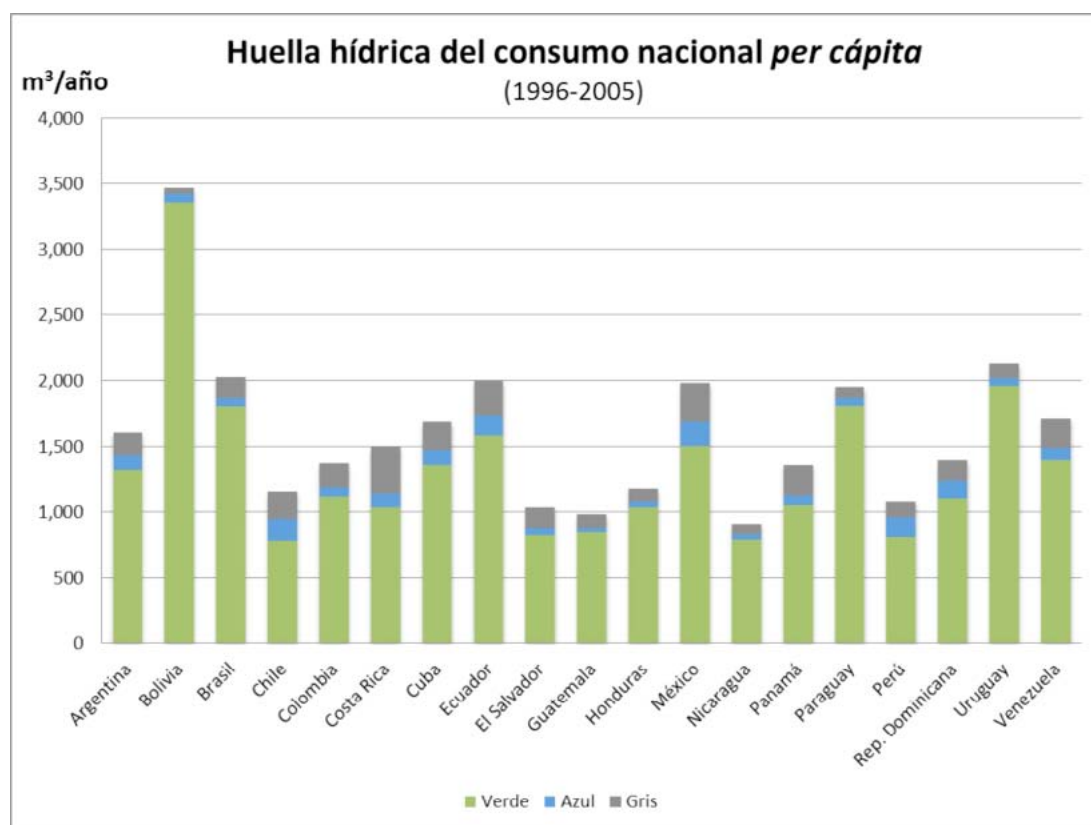


Figura 4.- Huella hídrica del consumo nacional per cápita en América Latina. Gráfica elaborada por los autores con datos de Mekonnen y Hoekstra, 2011, Apéndice VIII.

En cuanto a la huella hídrica del consumo nacional, la región concentró durante el periodo 1996-2005, el 10.5% de la huella hídrica global con el 8.2% de la población mundial. El volumen de la correspondiente a Brasil y a México amerita analizarse con profundidad, ya que estos dos países concentran el 6.5% de la huella hídrica global. Panamá, Nicaragua y Costa Rica reportaron la menor huella hídrica del consumo nacional de la región.

Por lo que respecta a la huella hídrica del consumo nacional *per cápita* la huella hídrica de la región, ésta fue 29% superior a la global. El principal reto para reducirla será cambiar hábitos de consumo, tanto de agua, como de bienes y productos en general, así como establecer mejores prácticas que permitan un uso más eficiente de agua, especialmente en los países con mayor huella hídrica per cápita: Bolivia, Uruguay, Brasil, Ecuador, México y Paraguay. La educación ambiental e hídrica tendrá un papel determinante. Nicaragua, Guatemala y El Salvador reportaron las menores huellas hídricas de la región.

Aunque creciente, el número de estudios y especialistas en el tema de huella hídrica en América Latina es muy limitado. Una mejor comprensión del tema puede ayudar a las naciones de la región a mejorar su toma de decisiones de política hídrica, agrícola y comercial y a promover un mejor uso del agua, nacional, regional y global. Por ello, resulta necesario fomentar la capacitación en el tema, su difusión y el desarrollo de estudios e investigaciones que permitan

validar, actualizar y mejorar la información existente, así como el análisis de las tendencias en los próximos años. Un paso alentador es que en algunos países de la región, como Colombia y México, ya se empiezan a elaborar estudios nacionales (Arévalo *et al*, 2012 y 2011; AgroDer, 2012).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AgroDer. 2012. *Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica*. WWF México y AgroDer. México DF.
- Allan, J.A. 1998. "Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits". *Ground Water*, 36: 545–546. National Ground Water Association, Westerville, Ohio.
- Arévalo, D., Lozano, J.G., Sabogal, J. 2011. "Estudio nacional de huella hídrica, Colombia, Sector agrícola", en *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, Universidad Politécnica de Cataluña, diciembre 2011, núm. 6, p. 101-126.
- Arévalo, D., Sabogal, J., Lozano, J.G., Martínez, J.S. 2012. *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica*. World Wildlife Fund. Cali, Colombia. 54 p.
- Falkenmark, M. 1995. "Land and Water Integration and River Basin Management", en *FAO Land and Water Bulletin* Number 1. Roma, Italia.

Hoekstra, A.Y. y Chapagain, A.K. 2008. *Globalization of Water Resources: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Blackwell Publishing, Oxford, Reino Unido.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. y Mekonnen, M.M. 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan, Londres, Reino Unido.

Hoekstra, Arjen Y. y Mekonnen, Mesfin M. 2012. *The water footprint of humanity*. University of Twente, Países Bajos. Editado por Peter H. Gleick, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, Oakland, California.

Mekonnen, M.M. y Hoekstra, A.Y. 2011. "National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption", en *Value of Water Research Report Series No. 50*, Apéndice

II, Virtual-water flows related to trade in crop, animal and industrial products, per country (Mm³/yr), UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos.

Mekonnen, M.M. y Hoekstra, A.Y. 2011. "National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption", en *Value of Water Research Report Series No. 50*, Apéndice VIII, The water footprint of national consumption per capita, shown by major consumption category and by internal and external component (m³/yr/cap), UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos.

Mekonnen, M.M. y Hoekstra, A.Y. 2011. "National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption", en *Value of Water Research Report Series No. 50*, Apéndice IX, The water footprint of national consumption per country (Mm³/yr), UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos.

**CALIDAD DEL AGUA EN POZOS DE LA RED DE MONITOREO
DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**
**WATER QUALITY IN WELLS OF THE NETWORK OF MONITORING
OF THE AQUIFER IN THE VALLEY OF SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO**

Yazmin Peña Hernández¹; Germán Santacruz de León²; Hilario Charcas Salazar³

RESUMEN

El objetivo de este artículo es identificar las familias de agua y analizar el comportamiento de la calidad química del agua del Sistema Acuífero del valle de San Luis Potosí (SAVSLP). El SAVSLP está constituido por tres tipos de acuíferos (somero, intermedio y profundo); el SAVSLP tiene una superficie de 1,800 km², está localizado en una zona árida, con una precipitación pluvial media anual de 386 mm, abastece al principal centro urbano del estado de San Luis Potosí, el cual cuenta con 970 mil habitantes. Se usaron 346 muestras de agua de pozos y norias obtenidas entre los años 1998 y 2009. La información se procesó y analizó con el software Aquachem 4.0 para identificar las familias de agua; para georeferenciar los pozos y norias se usó el software ArcGis 9.2. Los valores de calidad del agua se compararon con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 para uso doméstico. Para la clasificación en función del uso agrícola, se consideró a la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y a la Conductividad Eléctrica (CE). Los resultados muestran la presencia de nitratos de origen antropogénico en el acuífero somero, con valores máximos de 55.8 mg/l y flúor de origen natural en el acuífero profundo con valores máximos de 5.68 mg/l; por otro lado, el acuífero somero presentó altos niveles de salinidad, lo que restringe su uso para algunos cultivos.

Palabras clave: Acuífero, Calidad del agua, Contaminación del agua, San Luis Potosí, México.

ABSTRACT

The aim of this work was to identify the different types of families of water and analyze the chemical quality of water of the aquifer pertaining to the Valley of San Luis Potosí (AVSLP). The AVSLP consists of three types of aquifers (shallow, intermediated and deep), the AVSLP has an area of 1800 Km²; it is located in an arid zone, which has 970 thousand inhabitants. 346 samples of water were used, that were obtained between 1998 and 2009 coming from wells and water wheels. The information was processed and analyzed with the Aquachem 4.0 in order to identify the types of families of water. The wells and water wheels were georeferenced with ArcGis 9.2. The water quality values were compared with the maximum permissible limits established in NOM-127-SSA1-1994 for domestic use. For the agricultural water classification the sodium absorption ratio (SAR) was considered as well as the electrical conductivity (EC). The shallow aquifer had nitrates of the anthropogenic activities with a maximum concentration of 55.8 mg/l and fluorine was observed in the deep aquifer with a maximum concentration of 5.68 mg/l, on the other hand, the shallow aquifer had high levels of salinity, which restricts its use for some crops.

Keywords: aquifer, water quality, water contamination, San Luis Potosí, México.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un líquido que contiene materiales sólidos en solución y su composición química depende de la naturaleza y composición de dichos sólidos disueltos. La hidrogeoquímica estudia la composición química del agua subterránea, así como las reacciones provocadas por esa composición, lo que permite entender la interacción del agua con el material rocoso. Si se analiza un agua de reciente infiltración la composición de iones de calcio serán mayores que los de magnesio y éste será mayor que el del sodio; en el caso de los aniones la presencia de bicarbonatos será mayor que la de los sulfatos y éstos tendrán una mayor concentración que los clo-

ruros (Lillo, 2005; Price, 2003). Después de un largo tiempo de residencia, y por consecuencia del contacto del agua infiltrada con la roca, la composición se invierte, de manera que en este caso la concentración del sodio es mayor que la del magnesio y la de éste es mayor con respecto al calcio; lo mismo ocurre con los aniones (Lillo, 2005; Price, 2003).

La gran variedad de la composición química del agua y la búsqueda del entendimiento de la interacción entre el agua subterránea y los materiales rocosos han generado diferentes técnicas para reportar los componentes químicos del agua (Driscoll, 1986). Las mismas van desde tablas, gráficas o diagramas de pastel como los propuestos por Hill o Piper, además

¹ Maestría en Hidrosistemas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma San Luis Potosí.

² Profesor-Investigador del Programa "Agua y Sociedad". El Colegio de San Luis, A.C. Parque de Macul # 155, Col. Colinas del Parque. San Luis Potosí, S.L.P. C.P. 78299. México. Tel. (444) 8 11 01 01 ext. 6109. E-mail: gsantacruz@colsan.edu.mx.

³ Profesor-Investigador de la Maestría en Hidrosistemas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma San Luis Potosí

*Artículo enviado el 19 de junio de 2012
Artículo aceptado el 3 de diciembre de 2012*

de los llamados índices hidrogeoquímicos. El diagrama de Piper, permite analizar dicha composición y se emplea para compilar un gran número de análisis químicos de agua (Appelo y Postma, 2005; Kehew, 2001), y permite mostrar las variaciones en la composición química del agua.

Por otro lado, cada vez más se está poniendo atención al monitoreo y al análisis de la calidad del agua, sobre todo en los países en desarrollo; de manera que se han generado diferentes técnicas para reportar su calidad, entre ellos los llamados Índices de Calidad del Agua (ICA) los cuales agrupan uno o varios parámetros (Guzmán-Colis et al. 2011; Kankal et al. 2012), incluso con el soporte de técnicas estadísticas (Hafizan et al. 2011; Hülya y Hayal, 2007; Mohd et al. 2011; Papaioannou et al. 2010). Para el caso de México, a partir del año 2002, el ICA "oficial" sólo considera la materia orgánica medida como DBO o DQO (Espinosa et al. 2010; Jiménez, 2007), pero no considera la presencia de contaminación química y biológica. De manera que el ICA ofrece un valor numérico que integra diversos parámetros, lo cual se convierte o suele convertirse en una desventaja, sobre todo a los ojos de la opinión pública. Del mismo modo, el conocimiento de la calidad del agua para fines de uso agrícola es de suma importancia, aunque en México no existen parámetros normados, existen criterios que sirven como apoyo para la clasificación de agua de riego.

En México el agua subterránea es la principal fuente de abasto para diversos usos en las zonas áridas y semiáridas, el conocimiento de la composición química de la misma, en el tiempo y el espacio, es muy importante porque permite diferenciar zonas y, en función de dicha composición, destinarla al mejor uso posible. El acuífero del valle de San Luis Potosí tiene una superficie de 1,800 km² (Carrillo y Cardona, 2003), está localizado en una zona árida, con una precipitación pluvial media anual de 386 mm (Cardona, 2007), abastece al principal centro urbano del estado de San Luis Potosí, en el que habitan 970 mil habitantes; es la principal fuente de abastecimiento del agua para diversos usos en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (Alcalde, 2003; Carrillo y Cardona, 2003; Cirelli, 2004). Debido a dicha dependencia, se han realizado numerosos y diversos estudios que buscan develar sus condiciones geohidrológicas e hidrogeoquímicas (véase: Cardona, 2007; Carrillo y Cardona, 2003; Hergtet et al. 2009; López, 2012; Moran, 2010; Noyola et al. 2009). La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene una red de monitoreo de la calidad del agua subterránea que opera de manera regular en el acuífero del valle de San Luis Potosí, los datos obtenidos a partir de la misma son considerados como los de carácter oficial, esa información no ha sido analizada de manera sistemática.

El objetivo de este artículo es identificar las familias de agua y analizar la calidad química del agua del acuífero del valle de San Luis Potosí a partir de 346 muestras de agua obtenidas entre los años 1998 y

2009 para diferentes aprovechamientos hidráulicos subterráneos. La información fue procesada y analizada mediante el uso de hojas de cálculo, para su clasificación se usó el software Aquachem 4.0 y para localizar espacialmente los pozos se empleó el software ArcGis 9.2. Los valores encontrados se compararon, para el caso de uso doméstico, con los establecidos en las normas oficiales mexicanas. Para la clasificación en función del uso agrícola, se compararon con los criterios propuestos por Richards (1973), que considera a la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y la Conductividad Eléctrica (CE).

Los resultados obtenidos muestran que la clase de agua predominante, para uso agrícola, es la C₃S₁, que puede interpretarse como agua de salinidad alta y bajo contenido de sodio. Con respecto al uso doméstico, los resultados muestran que existen aprovechamientos con concentraciones de nitratos, fluoruros, cloruros, sulfatos, sólidos disueltos totales y sodio que exceden los valores establecidos en la NOM-SSA1-127-1994.

METODOLOGÍA

a. Localización y caracterización del área de estudio

El acuífero administrativo de San Luis Potosí se encuentra localizado en la zona conurbada de la ciudad de San Luis Potosí. Las coordenadas que limitan al acuífero son 21°54'54", 22°28'16" de latitud norte y los meridianos 100°37'8", 101°13'44" de longitud este (Figura 1). Los climas predominantes son el Semiseco Templado (BS₀kw), Seco Semicalido (BS₀hw), Seco Templado (BS₀kw.) hasta el Muy Seco Templado (BWkw.). Estos cuatro tipos de climas se caracterizan por presentar lluvias en el verano, son cálidos, con excepción del clima seco semicalido que tiene un invierno fresco, pero todos cumplen un intervalo del 5% al 10.2 % de precipitación en el invierno. En términos geológicos, la columna estratigráfica del altiplano Potosino incluye rocas sedimentarias y volcánicas cuyas edades varían del Cretácico a

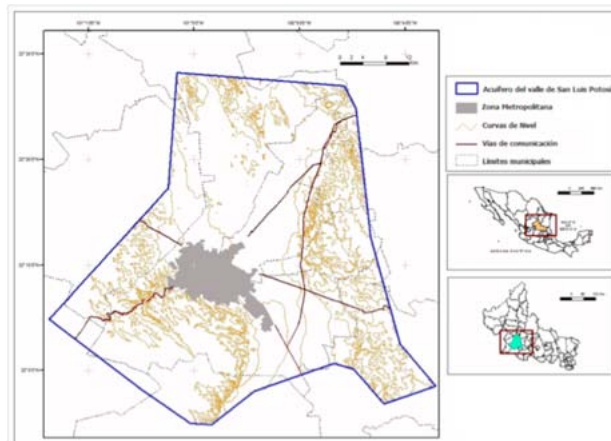


Figura 1 Localización del acuífero del valle de San Luis Potosí.

la edad reciente (Labarthe-Hernández et al. 1982 y 1992; Tristán-González, 1986; Aguillón-Robles et al. 1994; Nieto-Samaniego et al. 1996 y 1997). El valle está formado por fallas normales orientadas hacia el norte, los cuales se rellenaron con flujos piroclásticos, flujos de lava y abanicos aluviales con una distribución regional (COTAS, 2005).

Actualmente existe controversia en el número de acuíferos que constituyen el Sistema Acuífero del valle de San Luis Potosí (SAVSLP); en los años 1960 se plateaba, con base en el nivel estático y la temperatura del agua en algunos pozos, la existencia de dos acuíferos, uno somero y el otro profundo (Streeta y Del Arenal, 1960). En la década de los 1970, se señala la existencia de dos acuíferos, el somero conformado por material aluvial, con espesores de 250 m y el profundo considerado como confinado (Labarthe y Tristán, 1978); lo mismo, aunque con mayor información, se sigue sosteniendo en 1990, se dice que el acuífero somero está formado por una capa de arena, es de tipo libre con profundidades del nivel del agua entre 5 y 30 m; el acuífero profundo es de tipo confinado, en algunas partes la profundidad al nivel del agua es de 200 m y presenta aprovechamientos hidráulicos con profundidades de 350 m a 450 m, aunque existen pozos cuya perforación alcanza los 800 m a 1000 m (Cardona, 2007). Finalmente, en la última década se considera que el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, está constituido por tres acuíferos, el somero que es muy superficial con espesores de 40 m y formado por depósitos aluviales con limo, arena y grava (material poco permeable); el acuífero medio que está conformado por material granular y es el más explotado con pozos de hasta 350 m de profundidad, en material sedimentario, tiene un espesor que varía entre 100 a 200 m; y el acuífero profundo que está conformado por un medio fracturado (López, 2012; Noyola et al. 2009).

b. Recopilación, registro y organización de los datos de las muestras de agua.

La información se obtuvo de los archivos de los laboratorios de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que corresponden al periodo de 1998 al 2009. Con la información de calidad del agua se conformaron bases de datos, para lo cual se utilizó la hoja cálculo de Excel. Se construyó una matriz en la que las filas corresponden a las muestras de los distintos aprovechamientos y las columnas a los cationes Ca^{2+} , Mg^{+} , Na^{+} y K^{+} y a los aniones Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , NO_3^{-} y F^{-} .

c. Condición de electroneutralidad

Las soluciones de las muestras que se analizan deben cumplir con el principio de electroneutralidad, es decir, la suma de las cargas de todos los cationes debe ser igual a la suma de las cargas de todos los aniones, deben ser eléctricamente neutras (Fitts, 2002). Para comprobar la exactitud de los análisis

de los iones mayores se realiza el balance iónico. El error que resulta de dicho balance, se expresa por la diferencia de iones (Ecuación 1).

$$\% \text{ Electroneutralidad} = \frac{(\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones})}{(\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones})} \times 100 \quad (1)$$

En esta fórmula, los cationes y aniones se expresan en meq/l. Los iones que se suman son K^{+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Ca^{2+} , Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} y NO_3^{-} (Appelo y Postma, 1996 y 2005). Para que el análisis de una muestra sea válido, la amplitud de variación del porcentaje de electroneutralidad debe ser de $\pm 5\%$; aunque, se puede aceptar una amplitud de hasta $\pm 10\%$ (Freeze y Cherry, 1979). En este caso se consideró el intervalo de $\pm 10\%$.

d. Determinación de las familias de agua

La clasificación de familias de agua se realizó mediante el diagrama de Piper, el cual consta de dos triángulos equiláteros ubicados lateralmente y un rombo al centro: el triángulo izquierdo representa las concentraciones de los cationes, el derecho, las de los aniones; el rombo representa la intersección de las concentraciones de los cationes y aniones, y define la familia de agua a la que pertenece la muestra. (Appelo y Postma, 1996 y 2005; Lloyd y Heathcote, 1985). El diagrama de Piper permite reflejar las variaciones causadas por mezclas de aguas, precipitaciones-disoluciones, procesos de intercambio iónico y permite establecer de forma directa la evolución hidroquímica de las aguas (Lilo, 2007). Finalmente, el diagrama permite representar diversos tipos de agua en un sólo gráfico. Los diagramas de Piper se obtuvieron con el software AquaChem 4.0, un programa diseñado por Waterloo Hydrogeologic, que arroja representaciones gráficas y numéricas, además de que permite interpretar datos de calidad de aguas (Cox, 2006). La información validada del acuífero se importó hacia la plataforma del programa AquaChem 4.0. En este programa los datos de las muestras se clasificaron por año y por aprovechamiento, la primera, incluye todas muestras del mismo año, la segunda, comprendió sólo los aprovechamientos que contaban con datos de más de cinco años; finalmente se obtuvieron los diagramas de Piper para las dos clasificaciones.

e. Clasificación del agua en relación con el uso urbano

La calidad de agua potable es el grado de calidad requerido para que pueda ser usada en el consumo humano. Los resultados de calidad química del agua se compararon con los límites permisibles de calidad química para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

El comportamiento espacial de la calidad del agua se realizó mediante el programa ArgGIS 9.2; mien-

tras que la evaluación temporal se analiza a partir de gráficas generadas en hoja de cálculo Excel. En ambos casos, las variables evaluadas fueron el sodio, los sulfatos, los cloruros, fluoruros, nitratos y sólidos disueltos totales; es importante señalar que son diversos los daños a la salud que puede provocar la presencia de estos compuestos (OMS, 2006; Romero, 2009).

f. Clasificación del agua en relación con el uso agrícola

El agua para uso en riego agrícola se clasificó considerando la concentración total de sales (Conductividad Eléctrica) y la proporción de sodio con respecto a los cationes calcio y magnesio (Relación de Absorción de Sodio). Los dos índices considerados para efectos de salinidad o de sodicidad del agua, se conjuntaron e interpretaron con el apoyo del diagrama de Wilcox, propuesto por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América, tal diagrama considera la concentración total de sales solubles expresada representada por la conductividad eléctrica en $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C , los valores que corresponden a este parámetro se representan en el eje vertical. Por otro lado, la concentración de sodio en relación a la correspondiente al calcio y al magnesio, es decir el índice de relación de adsorción de sodio, es representada por líneas perpendiculares a las líneas de conductividad.

RESULTADOS Y DISCUSION

La información obtenida del archivo de la CONAGUA corresponde a datos de 346 muestras, de ellas 297 corresponden a 15 pozos profundos y 70 fueron tomadas en 3 norias, que constituyen la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del Acuífero del valle de San Luis Potosí (Tabla 1); es muy importante señalar que estos aprovechamientos subterráneos se encuentran en operación y se destinan a diversos usos; diez se destinan a uso público urbano, seis a uso agrícola y sólo uno de ellos se destina a uso industrial. El número total de aprovechamientos –para los distintos usos- registrados por la CONAGUA, ascienden a 1,194 (Figura 2).

En relación con la validación de los datos por la condición de electroneutralidad, los resultados muestras que, de las 346 muestras consideradas, el 1.7% no queda comprendido en el intervalo de $\pm 10\%$ (Figura 3). De acuerdo con lo establecido en la bibliografía especializada, 340 muestras cumplen la calidad necesaria para ser consideradas en el análisis de la composición química del agua.

Considerando que la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA comprende aprovechamientos (norias) en el acuífero somero y aprovechamientos (pozos) en el acuífero profundo, los resultados de las familias de agua se presentan considerando lo anterior. En la noria CNA-11-576-1 ha predominado la familia mixta cálcica; en la noria

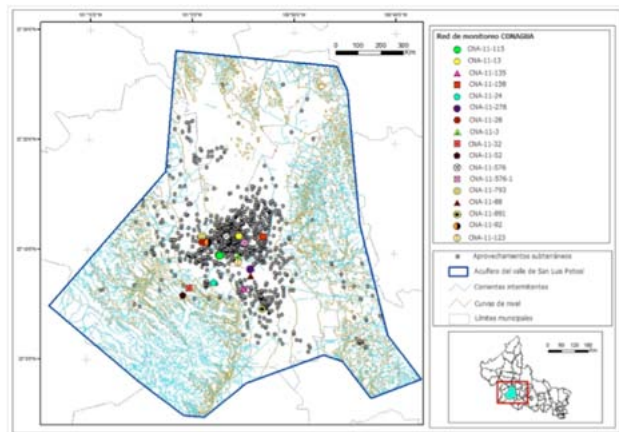


Figura 2. Localización de los pozos y norias de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA en el acuífero de San Luis Potosí.

CNA-11-891 cuyas extracciones se destinan a uso agrícola, se clasifica como bicarbonatada cálcica; en la noria CNA-11-135 predomina la familia mixta cálcica, aunque existen muestras clasificadas como bicarbonatadas cálcicas; finalmente en la noria CNA-11-158 predomina la bicarbonatada cálcica aunque también presenta muestras clasificadas como mixtas cálcicas (Figura 4); estos resultados coinciden con los encontrados por Cardona(2007) y Morán (2010).

Se elaboraron diagramas de Piper por año, en el en el concentrado general se observa que predominan las familias Bicarbonatada-Sódica, la Bicarbonatada-Mixta y la Bicarbonatada-Cálcica. Al realizar el análisis por pozo se observa que en el pozo CNA-11-576 (uso agrícola) predomina -con 48% de las muestras-el agua clasificada como Mixta-Cálcica y el 36 % se clasifican como Mixta-Mixta. En los pozos CNA-11-24, CNA-11-28 y CNA-11-3destinados a uso público urbano ha permanecido en el tiempo la familia de agua Bicarbonatada-Sódica (Figura 5). Los pozos anteriores explotan el acuífero profundo a profundidades que están entre los 200 a 400 metros.

En lo que respecta a la calidad del agua para uso público urbano –incluido el uso potable-, sólo 10 pozos de los 17 de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA se destinan a dicho uso; sin embargo, se analiza el comportamiento de la calidad del agua en las norias que explotan el acuífero somero aunque no cumple las condiciones de calidad para uso doméstico.

En tal sentido puede verse que en las norias CNA-11-576-1 y CNA-11-135 se tienen valores máximos de 303.5 mg/l y de 304.8 mg/l respectivamente, que sobrepasan los 250 mg/l establecido como máximo permisible para la presencia de cloruros. El valor máximo de sulfatos se presentó en el aprovechamiento CNA-11-576-1 en el año 2007 y fue de 617.9 mg/l, la norma oficial mexicana establece un límite máximo de 400 mg/l para este parámetro. En relación con los

Tabla 1. Localización geográfica, volúmenes extraídos, usos y número de muestras extraídas en la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA en el acuífero de San Luis Potosí, México.

| Clave RED | Clave CONAGUA | x | y | Tipo de Aprovechamiento | Número de muestras | Profundidad (m) | Q (lps) | Uso |
|-----------|---------------|---------|-------|-------------------------|--------------------|-----------------|---------|----------------|
| EACCN-10 | CNA -11-576 | -100.94 | 22.19 | Pozo | 22 | N/D | 5 | Agrícola |
| EACCN-09 | CNA -11-576-1 | -100.91 | 22.18 | Noria | 25 | N/D | 4 | Agrícola |
| EACCN-01 | CNA -11-891 | -100.88 | 22.08 | Noria | 24 | N/D | N/D | Agrícola |
| EACCN-03 | CNA -11-793 | -100.98 | 22.19 | Pozo | 24 | 270 | N/D | Agrícola |
| EACCN-11 | CNA -11-135 | -100.91 | 22.11 | Pozo | 21 | N/D | 17.28 | Industrial |
| EACCN-02 | CNA -11-13 | -100.92 | 22.19 | Pozo | 19 | 400 | 16.93 | Público Urbano |
| EACCN-12 | CNA -11-158 | -100.88 | 22.19 | Noria | 21 | N/D | 9 | Agrícola |
| EACCN-07 | CNA -11-32 | -101.00 | 22.11 | Pozo | 26 | 300 | 20 | Público Urbano |
| N/D | CNA -11-52 | -101.01 | 22.10 | Pozo | 16 | 300 | 15 | Público Urbano |
| EACCN-05 | CNA -11-3 | -100.92 | 22.16 | Pozo | 16 | 217 | 24 | Público Urbano |
| EACCN-04 | CNA -11-24 | -100.96 | 22.12 | Pozo | 29 | 300 | 17 | Público Urbano |
| EACCN-06 | CNA -11-28 | -100.98 | 22.18 | Pozo | 25 | N/D | 10 | Público Urbano |
| EACCN-08 | CNA -11-92 | -100.97 | 22.18 | Pozo | 27 | 300 | 33 | Público Urbano |
| N/D | CNA -11-278 | -100.90 | 22.14 | Pozo | 18 | N/D | 32 | Agrícola |
| PACCN-06 | CNA -11-115 | -100.95 | 22.16 | Pozo | 11 | 267 | 20 | Público Urbano |
| PACCN-07 | CNA -11-88 | -100.90 | 22.13 | Pozo | 8 | 350 | 38 | Público Urbano |
| PACCN-05 | CNA-11-123 | -100.92 | 22.15 | Pozo | 11 | 300 | 29.44 | Público Urbano |

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CONAGUA.

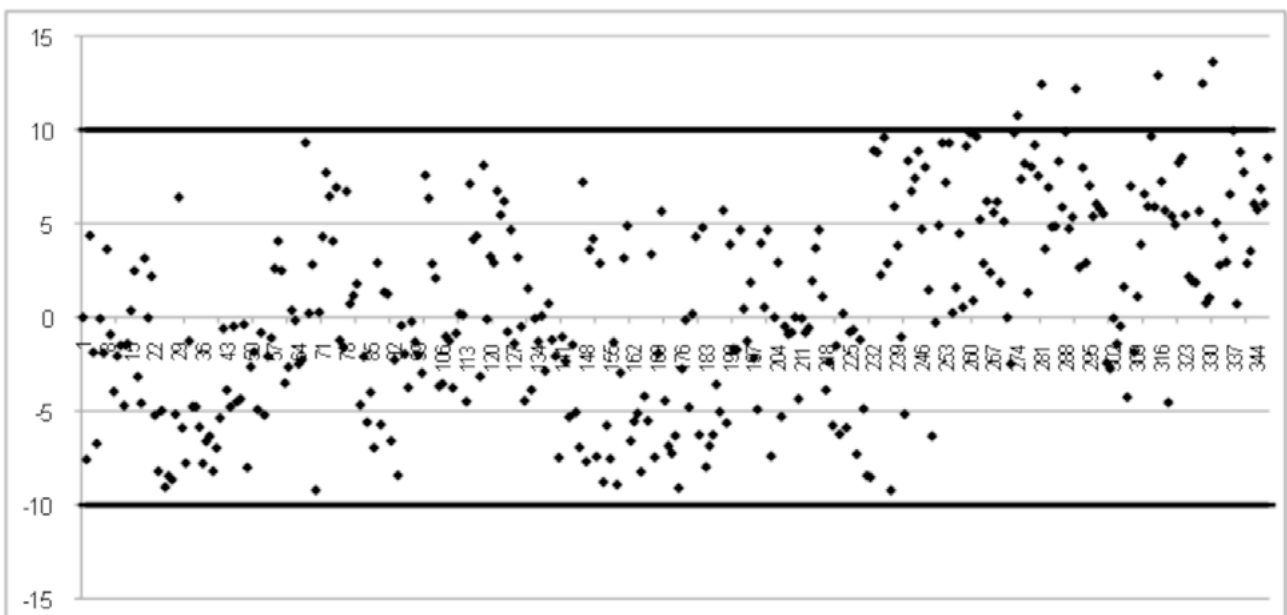


Figura 3. Porcentaje de electroneutralidad de las muestras tomadas en la Red de Monitoreo del acuífero de San Luis Potosí.

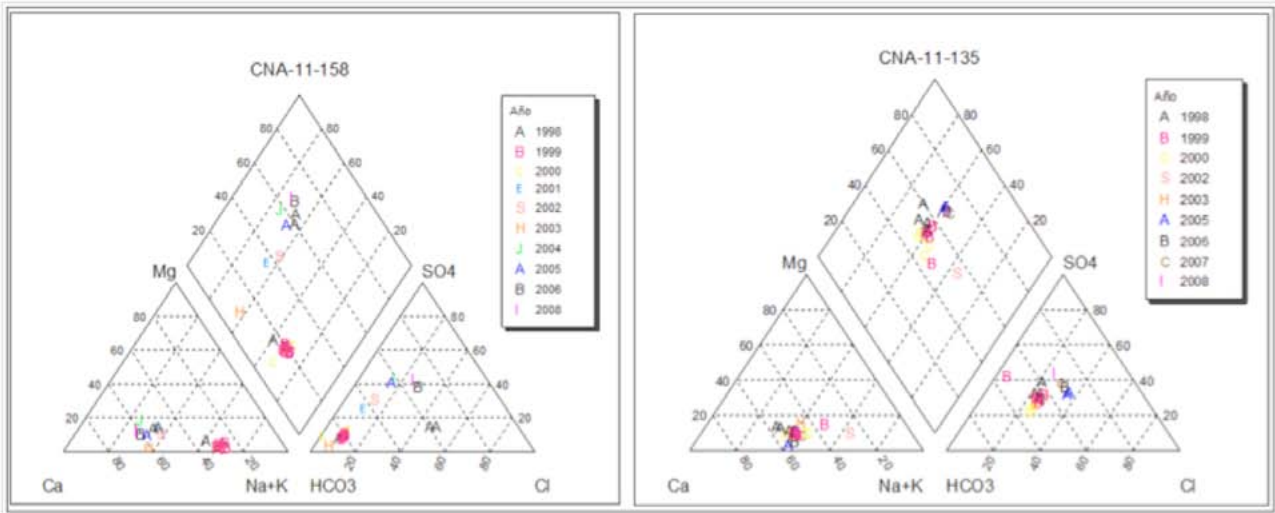


Figura 4. Diagrama de Piper (comportamiento temporal) para las norias CNA-11-158 y CNA-11-135 del acuífero de San Luis Potosí.

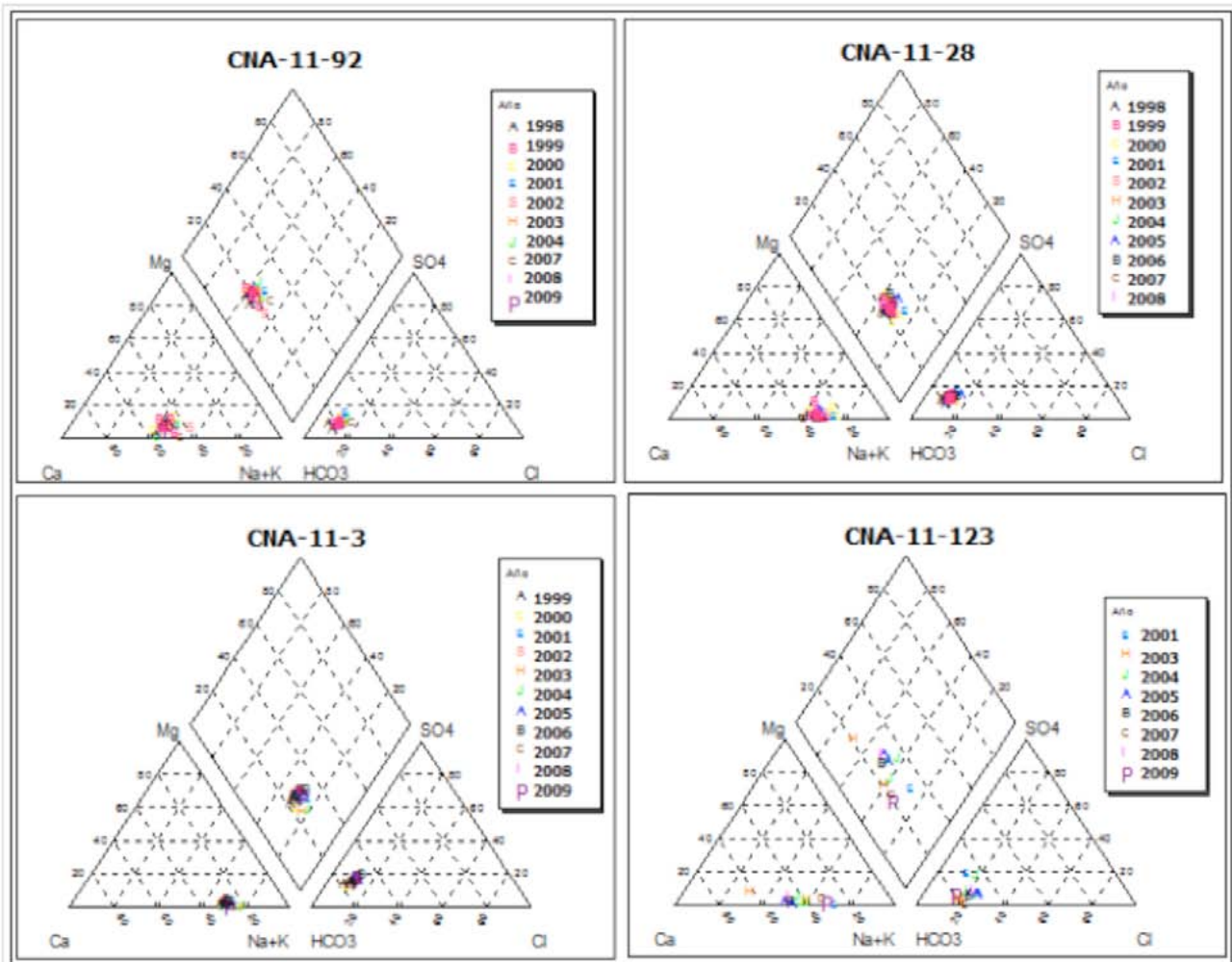


Figura 5. Diagrama de Piper para los pozos (comportamiento temporal) de la Red de Monitoreo de la calidad del agua en el acuífero de San Luis Potosí.

sólidos disueltos totales (SDT), esas mismas norias son las que sobrepasan los 1000 mg/l establecidos en la NOM-127-SSA-1994. Especial atención se le debe poner a la presencia de nitratos, en este caso sólo la noria CNA-11-576-1, con un valor máximo de 55.8 mg/l, rebasa los 10 mg/l establecidos en la norma mexicana (Tabla 2). Los resultados anteriores coinciden con los reportados para el acuífero somero por diversos autores, los cuales concluyen que este acuífero presenta contaminación de tipo antropogénica, debido fundamentalmente a las actividades industriales y agrícolas (Cardona, 2007; Carrillo-Rivera y Armienta, 1990; Hergt et al. 2009; López, 2012; Morán, 2010).

En el acuífero medio y profundo se localizan los aprovechamientos destinados a extraer agua para uso doméstico y público-urbano; los resultados de calidad del agua muestran contaminación química de tipo natural, relacionada con la presencia de fluoruros cuyo origen se encuentra en las rocas volcánicas fracturadas, por lo que durante el movimiento del agua subterránea a través de las fracturas, interacciona con su matriz vítrea y minerales como el topacio y la fluorita ricos en flúor (Bocanegra, 2005; Cardona, 2007; López, 2012; Noyola et al. 2009); sin embargo, puede señalarse que los niveles de

contaminación, que rebasan considerablemente lo establecido en la normatividad ambiental mexicana, se han incrementado como resultado del minado del acuífero. Los valores máximos encontrados, hasta el momento, son de 5.68 mg/l de fluoruros en el pozo CNA-11-3 cuya profundidad es de 220 m; este pozo en conjunto con los clasificados como CNA-11-28, CNA-11-24, CNA-11-278, CNA-11-52, CNA-11-32 y CNA-11-115, son los que exceden el límite máximo permisible en la NOM-127-SSA1-1994 (Figura 6) dichos valores son similares a los reportados por Cardona, 2007 y López, 2012.

En la tabla 1 puede verse que básicamente son las norias y un par de pozos profundos los que se destinan para uso agrícola; de manera que se pone énfasis en estos aprovechamientos en relación con la clasificación del agua para uso agrícola. Las norias CNA-11-576-1 y CNA-11-135 presentan aguas clase C3S1 y C4S1, dicho comportamiento permanece en el tiempo (Figura 7), estos resultados coinciden con lo reportado para el acuífero somero por Sarabia et al. (2011) y Morán (2010). Dichos aprovechamientos están perforados a profundidades que varían de 22 a 50 m; por lo que se podría considerar que las norias o pozos que están perforados a profundidades menores a 50 m y se localizan hacia el oriente del

Tabla 2. Valores máximos, mínimos y desviación estándar (mg/l) de parámetros de calidad del agua en norias del acuífero somero de San Luis Potosí

| Parámetro | | Aprovechamientos | | |
|-----------|---------------------|------------------|-------------|-------------|
| | | CNA-11-576-1 | CNA -11-135 | CNA -11-158 |
| SDT | Máximo | 2106.2 | 1835.8 | 830.0 |
| | Mínimo | 1051.0 | 865.3 | 224.5 |
| | Promedio | 1431.5 | 1595.0 | 490.8 |
| | Desviación Estándar | 292.9 | 339.1 | 209.0 |
| Na | Máximo | 292.5 | 312.5 | 61.6 |
| | Mínimo | 110.6 | 135.6 | 13.3 |
| | Promedio | 180.8 | 194.6 | 38.0 |
| | Desviación Estándar | 39.2 | 45.8 | 11.1 |
| Cl | Máximo | 303.5 | 304.8 | 104.1 |
| | Mínimo | 83.5 | 35.0 | 1.5 |
| | Promedio | 214.0 | 189.6 | 25.7 |
| | Desviación Estándar | 56.4 | 53.9 | 29.7 |
| SO4 | Máximo | 617.9 | 472.5 | 184.3 |
| | Mínimo | 102.0 | 197.3 | 3.8 |
| | Promedio | 311.5 | 312.2 | 40.4 |
| | Desviación Estándar | 93.9 | 71.2 | 50.6 |
| NO3 | Máximo | 55.8 | 0.9 | 2.8 |
| | Mínimo | 0.4 | 0.4 | 0.2 |
| | Promedio | 6.2 | 0.6 | 1.3 |
| | Desviación Estándar | 14.2 | 0.2 | 0.7 |

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Variación temporal de fluoruros (mg/l) en los aprovechamientos de la red de monitoreo del sistema acuífero del valle San Luis Potosí.

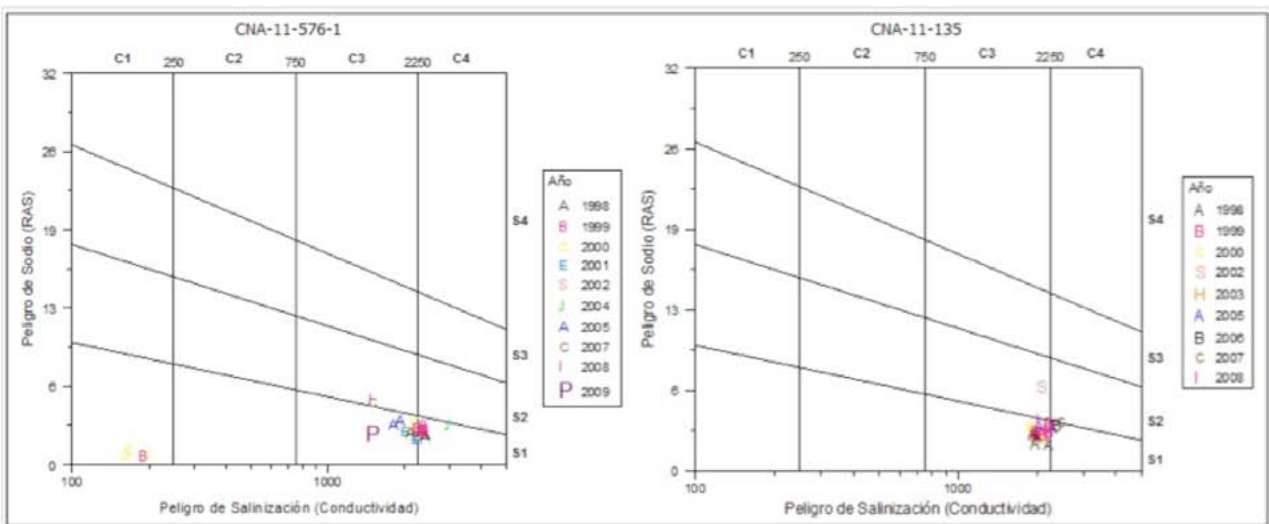


Figura 7. Variación temporal de las clases de agua en las norias CNA-11-576-1 y CNA-11-135.

acuífero, pueden presentar estas clases de agua. De acuerdo con esa clasificación, el agua de esas norias es altamente salina y de bajo contenido de sodio, de manera que se puede usar para el riego de cultivos tolerantes a la salinidad, en suelos con adecuadas condiciones de drenaje; aunque otros especialistas señalan que el uso de esta agua tiene un grado de restricción moderado para el riego de una amplia variedad de cultivos (Ayers y Westcot, 1985).

En el caso de los pozos que explotan el acuífero medio y que se destinan a uso agrícola, los peligros por la presencia de sodio son bajos y los de salinización son de bajos a medios, dando como resultados aguas clase C2S1 y C3S1 para el pozo CNA-11-278 y C2S1 para el pozo CNA-11-793 (Figura 8). Los resultados anteriores se pueden explicar por el hecho de que en el acuífero de San Luis Potosí se presentan dos patrones de flujo de la escorrentía: i) del área de

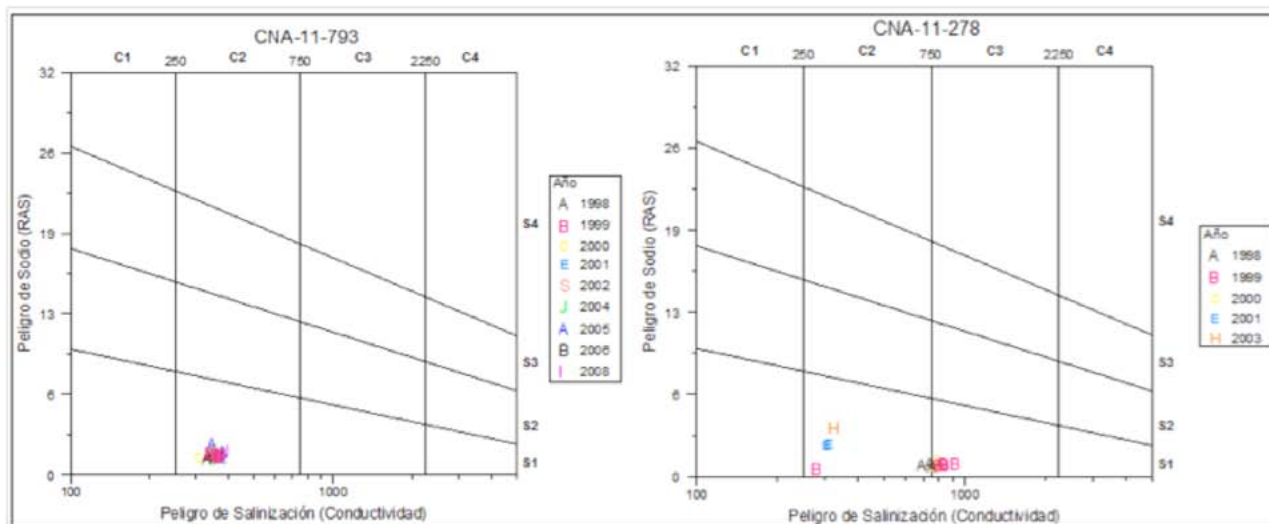


Figura 8. Variación temporal de las clases de agua en los pozos CNA-11-793 y CNA-11-278.

recarga occidental (sierra de San Miguelito) hacia el centro del valle, con un trayecto relativamente corto e infiltración a través de materiales granulares de origen ígneo; ii) del área de recarga oriental (sierra de Álvarez) hacia el centro del valle, con un trayecto más largo e infiltración a través de materiales ígneos y calizos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los pozos y norias de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del Sistema acuífero del valles San Luis Potosí, que son coincidentes con los reportados en otras investigaciones, permiten concluir que el acuífero somero se encuentra contaminado por componentes químicos, que en algunos casos requieren atención especial como es la presencia de nitratos, cuyo origen está en fuentes antropogénicas. Por otro lado, permiten concluir que el acuífero profundo presenta altos niveles de contaminación por flúor, los cuales ya presentan efectos notables en la salud de los habitantes, si bien es cierto que dicho elemento tiene un origen natural, las altas concentraciones (5.6 mg/l) han sido provocadas también por el minado del acuífero.

En lo que respecta a las condiciones del agua para uso agrícola, las extracciones del acuífero profundo, y esto coincide con lo reportado en otras investigaciones para ciertos años, se clasifican como aguas tipo C_2S_1 pertinentes para el riego de la mayoría de los cultivos; sin embargo, el acuífero somero, del cual se extrae grandes volúmenes de agua para uso agrícola, presenta aguas tipos C_3S_1 y C_4S_1 , con contenidos altos y muy altos de sales, lo que restringe su uso a cultivos tolerantes a ellas.

Finalmente, es claro que la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del Sistema acuífero del valles San Luis Potosí operada por la CONAGUA arroja valores que coinciden con los reportados en investigaciones

similares, pero no reflejan las variaciones espaciales de la contaminación del sistema acuífero; por lo tanto, es conveniente determinar y operar una red de monitoreo constituida de norias y pozos que sea representativa de las condiciones hidrogeoquímicas actuales.

AGRADECIMIENTOS

A la Gerencia Estatal en San Luis Potosí y a la Gerencia de Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua, México.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguillón R., Aranda-Gómez, J. y Solorio-Munguía, G. 1994. Geología y tectónica de un conjunto de domos riolíticos del Oligoceno medio en el sur del Estado de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1): 29-42.
- Alcalde, R. 2003. La Política Intergubernamental del servicio de agua potable en San Luis Potosí, S.L.P. 1989-2002. Tesis de Maestría en Administración y Políticas Públicas de El Colegio de San Luis, A.C. México. 347 Pp.
- Appelo, A. y Postma D. 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema. Segunda Edición.
- Appelo, A. y Postma, D. 1996. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema.
- Ayers, S. y Westcot, D. 1985. *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia.
- Bocanegra, M. 2006. Evaluación de Riesgo en Salud por la Exposición a Fluoruro, Arsénico en Agua de Pozo para Consumo de las Zonas Altiplano, Centro y Media del Estado de San Luis Potosí. San Luis Po-

- tosí, México. Tesis de Maestría. Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Cardona, A. 2007. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo, regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y Contaminación. Tesis de doctorado. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Carrillo-Rivera, J. y Armienta, A. 1990. Diferenciación de la contaminación inorgánica de las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, México. *Geofísica Internacional*, 28(4): 763-783.
- Carrillo, J. y Cardona, A. 2003. Entorno hidrogeológico de San Luis Potosí. En: Price, M. (Editor) *Agua Subterránea*. Limusa-Noriega Editores. México. pp. 274-319.
- CEPIS. 2004. Guías de la calidad del agua para consumo humano. 24/09/2010. <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/guiasoms3corr.pdf>. Tercera edición.
- Cirelli, C. 2004. Agua desechada, agua aprovechada. Cultivando en las márgenes de la ciudad. El Colegio de San Luis, A.C. S.L.P., México. 224 Pp.
- Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). 2005. Estudio Técnico para la reglamentación de la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas y modificación de la veda del Acuífero San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí. México
- Cox, C. 2006. Tutorial de AQUACHEM 4.0. Hidrogeología. 30/04/2010.
- URL: http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/Hidro_MOD5/Tutorial%20AQUACHEM.pdf.
- Driscoll, G. 1986. *Groundwater and wells*. Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul, Minnesota, Third Printing, 1089 pp.
- Espinosa García A., Aguilar Medina M. y Mazari-Hiriart M. 2010. Calidad, una limitante más para la disponibilidad del agua. En Alonso Aguilar Ibarra (coord.) *Calidad del agua: un enfoque multidisciplinario*. UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas, México. 308 p. pp. 25-54.
- Freeze, R. y Cherry, J. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- Guzmán-Colis G., Thalasso F., Ramírez-López M., Rodríguez-Narciso E., Guerrero-Barrera A. y Avelar-González F. 2011. Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 27 (2) 89-102.
- Hafizan J., Sharifuddin M., Mohd K., Tengku H., Mohd A., Mohd E. y Mazlin M. 2011. Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environ. Monit. Assess.*, (173):625–641
- Hergt, T., Castro-Larragoitia, J., Cardona-Benavides, A. y Carrillo-Rivera, J. 2009. Análisis multivariado en la definición de sistemas de flujo de agua subterránea en San Luis Potosí, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XXV, núm. 4, II Época, octubre-diciembre.
- Hülya B. y Hayal B. 2007. Surface Water Quality Assessment by Environmetric Methods. *Environ. Monit. Assess.*, (131): 371–376
- Jiménez, B. 2007. Información y Calidad del Agua en México. *Revista Trayectorias*. 9 (24): 45-56.
- Kankal N., Indurkar M., Gudadhe S. y Wate S. 2012. Water Quality Index of Surface Water Bodies of Gujarat, India. *Asian J. Exp. Sci.*, 26 (1): 39-48.
- Kehew, E.A. 2001. *Applied chemical hidrogeology*. N.J., Prentice Hall.
- Labarthe G. y Tristán M. 1978. Cartografía geológica hoja "San Luis Potosí". Folleto Técnico No.59. Instituto de Geología y Meteorología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 41 pp.
- Labarthe G., Tristan M. y Aranda J. 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico en la parte central del estado de San Luis Potosí. Folleto Técnico No. 85. Instituto de Geología y Meteorología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Labarthe G. y Jiménez-López L. 1992. Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la sierra de San Miguelito, S.L.P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico.
- Lilo, J. 2007. *Técnicas Hidrogeoquímicas*. 22/03/2010. Universidad Rey de Juan Carlos. <http://www.escet.urjc.es/~jlillo/TecnicasHidrogeoquimicas.pdf>.
- Lloyd, W. y Heathcote, A. 1985. *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater*. Clarendon Press, New York.
- López, B. 2012. Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica. Tesis de Doctorado. División de Geociencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- Mohd S., Hafizan J., Sharifuddin M. y Nur H. 2011. Surface River Water Quality Interpretation Using Environmetric Techniques: Case Study at Perlis River Basin, Malaysia. *International Journal of Environmental Protection*, 1 (5): 1-8.
- Morán J. 2010. Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura. Universidad del Noroeste, Tamaulipas, México.
- Nieto-Samaniego, F., Macías-Romo, C. y Alaniz-Álvarez A. 1996. Nuevas edades isotópicas de la cubierta

- volcánica cenozoica de parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 13(1): 117-122
- Nieto-Samaniego, F. Alaniz-Álvarez, A. y Labarthe-Hernández, G. 1997. La deformación Cenozoica Poslaramídica en la parte meridional de la mesa central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14 (1): 13-25.
- Noyola-Medrano, M., Ramos-Leal, J., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L., López-Loera, H. y Carbajal, N. 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (2): 395-410.
- NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de Febrero de 1996. México. (Disponible en www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html).
- Papaioannou A., Dovriki E., Rigas N., Plageras P., Rigas I., Kokkora M. y Papastergiou P. 2010. Assessment and Modelling of Groundwater Quality Data by Environmetric Methods in the Context of Public Health. *WaterResour. Manage.*, DOI 10.1007/s11269-010-9605-0
- Price, M. 2003. Agua subterránea. Limusa-Noriega Editores. México.
- Richards A. 1973. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Ed. Limusa. México.
- Romero, R. 2009. Calidad del agua. Editorial Escuela colombiana de Ingeniería.
- Sarabia I., Cisneros R., Aceves J., Durán H. y Castro J. 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27 (2) 103-113.
- Stretta, E.J.P. y Del Arenal, R., 1960. Estudio para el abastecimiento de agua potable para la Ciudad de San Luis Potosí. AppliedSciencesInstitute, HydrologySection, UNESCO-Instituto de Geofísica, UNAM. Reporte Interno, 40 p.
- Tristán-González, M. 1986. Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico.