



# Tecnología y Ciencias de Agua

ISSN 2007-2422

• Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt)

Incluida en Thomson Reuters Science Citation Index® (ISI) • Expanded Thomson Reuters Research Alert® (ISI) • EBSCO • ProQuest • Elsevier • Redalyc



Foto: Luis Alberto Bravo Inclán

## Consejo Editorial

Dr. Adrian Pedrozo Acuña

*Director general del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

**Editor en Jefe**

**Editor en Agua y Energía**

Dr. Humberto Marengo Mogollón  
*Consultor*

**Editora en Calidad del Agua**

Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros  
*Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la  
Ciencia y la Cultura*

**Editor en Ciencias Hidroagrícolas**

Dr. Fedro Zazueta Ranahan  
*University of Florida, Estados Unidos*

**Editora en Ciencias Políticas y Sociales**

Dra. Jacinta Palerm Viçqueira  
*Colegio de Postgraduados, México*

**Editor en Gestión del Agua**

Dr. Carlos Fernández-Jáuregui  
*Water Assessment and Advisory-Global Network (WASA-GN)*

**Editor en Hidráulica**

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés  
*Universidad Nacional Autónoma de México*

**Editor en Hidrología**

Dr. Fco. Javier Aparicio Mijares  
*Consultor*

**Editor en Innovación Científica y Tecnología**

Dr. Polioptro F. Martínez Austria  
*Universidad de las Américas, Puebla*

**Secretario Técnico**

Mtro. Alberto Rojas Rueda  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*

**Coordinación editorial y cuidado de edición**

Lic. Helena Rivas López  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*

**Seguimiento del proceso de arbitraje:** Josefá Figueroa Miranda y Luis Aviles Rios • **Marcación XML:** Luisa Guadalupe Ramírez Martínez •

• **Dr. Adrián Pedrozo Acuña**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Alcides Juan León Méndez**, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba • **Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco**, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México • **Dr. Alejandro López Alvarado**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile • **Dra. Alma Chávez Mejía**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez**, consultor, México • **Dr. Andrei S. Jouravlev**, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile • **Dr. Andrés Rodríguez**, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina • **Dra. Anne Margrethe Hansen Hansen**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Ariosto Aguilar Chávez**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Armando Guevara Gil**, Pontificia Universidad Católica, Perú • **Dr. Arturo Marcano**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Venezuela • **Dra. Aziza Akhmouch**, Organisation for economic Cooperation and Development, Francia • **Dr. Carlos Chairez Araiza**, Consultor, México • **Dr. Carlos Cruickshank Villanueva**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Carlos Díaz Delgado**, Universidad Autónoma del Estado de México • **Dr. Carlos E. Puente**, University of California, Estados Unidos • **Dr. Cleverson Vítório Andreoli**, Centro Universitario Unifae, Brasil • **Dr. Daene C. McKinney**, University of Texas at Austin, Estados Unidos • **Dr. Daniel Murillo Licea**, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México • **Dr. Eduardo A. Varas Castellón**, Pontificia Universidad Católica, Chile • **Dr. Emmanuel Galindo Escamilla**, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México • **Dr. Enrique Cabrera Marcet**, Universidad Politécnica de Valencia, España • **Dr. Enrique Playán Jubillar**, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España • **Dr. Eric Rendón Schneir**, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú • **Dr. Erick R. Bandala**, Desert Research Institute, Reno, Estados Unidos • **Dr. Ernesto José González Rivas**, Universidad Central de Venezuela • **Dr. Federico Estrada**, Centro de Estudios y Experimentación de obras públicas, España • **Dr. Gerardo Buelna**, Centre de Recherche Industrielle Québec, Canadá • **Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez**, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México • **Dr. Gueorguiev Tzatchkov Velitchko**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Ing. Héctor Garduño Velasco**, consultor, México • **M.I. Horacio Rubio Gutiérrez**, Comisión Nacional del Agua, México • **Dr. Ismael Aguilar Barajas**, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México • **Dr. Ismael Mariño Tapia**, Instituto Politécnico Nacional, México • **Dr. Ismael Piedra Cueva**, Universidad de la República, Uruguay • **Dr. Iván Obando Camino**, Universidad de Talca, Chile • **Dr. Jaime Iván Ordóñez Ordóñez**, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia • **Dr. Joaquín Rodríguez Chaparro**, Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, España • **Dr. José Ángel Raynal Villaseñor**, Universidad de las Américas, Puebla, México • **Dr. José D. Salas**, University of Colorado, Estados Unidos • **Dr. José Joel Carrillo Rivera**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. José Luis Pimentel Equihua**, Colegio de Postgraduados, México • **José María Gómez Espín**, Universidad de Murcia, España • **M.C. Juan Andrés Martínez Álvarez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Juan B. Valdes**, The University of Arizona, Estados Unidos • **Dr. Juan Pedro Martín Vide**, Universidad Politécnica de Cataluña, España • **Dr. Julio Kuroiwa Zevallos**, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú • **Dr. Karim Acuña Askar**, Universidad Autónoma de Nuevo León, México • **Dra. Luciana Coutinho**, Universidad de Do Minho, Portugal • **Dr. Luis F. León Vizcaíno**, Waterloo, University, Canadá • **Dr. Luis Teixeira**, Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay • **Dra. Luísa Paré Ouellet**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Manuel Contijoch Escontria**, consultor • **Dr. Marcos von Sperling**, Universidad Federal de MinasGerais, Brasil • **Dra. María Claudia Campos Pinilla**, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia • **Dra. María Luisa Torregrosa Armentia**, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, México • **Dra. María Rafaela De Saldanha Matos**, Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Portugal • **Dra. María Teresa Oré**, Pontificia Universidad Católica del Perú • **Dra. María Victoria Vélez Otálvaro**, Universidad Nacional de Colombia • **M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Michel M. Rosengaus Moshinsky**, consultor, México • **Dr. Miguel A. Medina**, Duke University, Estados Unidos • **Dr. Moisés Berezowsky Verduzco**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Omar A. Miranda**, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina • **Dr. Oscar L. Palacios Vélez**, Colegio de postgraduados • **Dra. Natalia Uribe Pando**, Water Lex, Suiza • **Dr. Óscar F. Ibáñez Hernández**, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez • **Dr. Paulo Salles Alfonso de Almeida**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Rafael Val Segura**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Rafael Pardo Gómez**, Instituto Superior Politécnico • **Dr. Ramón Domínguez Mora**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Ramón Fuentes Aguilar**, Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Chile • **Dr. Ramón Ma. Gutiérrez Serret**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Ing. Raquel Duque**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Colombia • **Dr. Raúl Antonio Lopardo**, Instituto Nacional del Agua, Argentina • **Dr. Rodolfo Silva Casarín**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Serge Léonard Tamari Wagner**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Simón González Martínez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Tomás Martínez Saldaña**, Colegio de Postgraduados, México • **Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka**, Comisión Nacional del Agua. **Dra. Ximena Vargas Mesa**, Universidad de Chile

© **TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA**, vol. 10, núm. 2, marzo-abril de 2019, es una publicación bimestral, editada y distribuida por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac núm. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, México, teléfono: +(52) (777) 3293670 o 3293600, extensiones 474 y 342, fax: + (52) (777) 3293670. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2011-091215154300-102, ISSN, 2007-2422, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Número de Certificado de Licitud de Título y Contenido 16200.

La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde exclusivamente a los autores y no necesariamente refleja la postura del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Derechos reservados. Se permite la reproducción total o parcial, siempre y cuando se mencione esta fuente y se envíe a esta redacción un ejemplar de la publicación.

**Tecnología y ciencias del agua** constituye la continuidad de las revistas *Irrigación en México* (1930-1946); *Ingeniería hidráulica en México* (1947-1971); *Recursos hidráulicos* (1972-1978); *Ingeniería hidráulica en México*, segunda época (1985-2009), y *Tecnología y Ciencias del Agua*, Antes *Ingeniería Hidráulica en México* (2010-2011).

## Artículos

Normatividad, gestión pública del agua y  
ambientalismo de mercado en México: un análisis  
desde los proyectos políticos (2012-2018)

Daniel Tagle-Zamora  
Alex R. Caldera-Ortega  
Mario E. Fuente-Carrasco

La adopción social de tecnologías apropiadas en  
Chitejé de Garabato, Querétaro, México; un estudio  
exploratorio

Daniel Murillo Licea  
Roberto Romero Pérez  
Eduardo López Ramírez

Tratamiento biológico de desnitrificación de aguas  
residuales usando un reactor de biopelícula con cáscara  
de arroz como fuente de energía

Joseph J. Sánchez-Balseca  
Isaías M. Muñoz-Rodríguez  
María Belén Aldás-Sandoval

Condiciones hídricas en la Cuenca del Valle de México  
Salvador Peña Díaz

Evaluación del coeficiente de reflexión en diques  
rompeolas de piezas sueltas con perfil en S

Jair Del Valle  
Edgar Mendoza  
Juan C. Alcérreca-Huerta  
Rodolfo Silva

Observaciones y análisis de parámetros  
hidromorfológicos de la playa Las Glorias, México  
Cuauhtémoc Franco Ochoa

Fernando García Paéz  
Wenseslao Plata Rocha  
José Miguel Montoya Rodríguez  
Miguel Ángel Vergara Sánchez

Análisis de declinación de la producción para la  
caracterización de yacimientos

Alfonso Aragón-Aguilar  
Víctor Arellano-Gómez  
Rosa María Barragán-Reyes  
Pedro Guido-Aldana

Estimación temprana del rendimiento de la cosecha de  
trigo en el distrito de riego 038, Río Mayo, Sonora,  
México

Enrique Palacios-Vélez  
Luis Palacios-Sánchez  
José Luis Espinosa-Espinosa

## Articles

*Regulation, public water management and market  
environmentalism in Mexico: an analysis from  
political projects* 1

Daniel Tagle-Zamora  
Alex R. Caldera-Ortega  
Mario E. Fuente-Carrasco

*The social adoption of appropriate technologies in  
Chitejé de Garabato, Querétaro, México; an  
exploratory study* 35

Daniel Murillo Licea  
Roberto Romero Pérez  
Eduardo López Ramírez

*Biological treatment of denitrification in wastewater  
using a biofilm reactor with rice shell as energy  
source* 78

Joseph J. Sánchez-Balseca  
Isaías M. Muñoz-Rodríguez  
María Belén Aldás-Sandoval

*Water conditions in the Valley of Mexico Basin* 98

*Numerical and experimental assessment of the  
reflection coefficient of rubble mound breakwaters  
with an "S" shaped profile* 128

Jair Del Valle  
Edgar Mendoza  
Juan C. Alcérreca-Huerta  
Rodolfo Silva

*Observation and analysis of hydro-morphologic  
parameters in Las Glorias beach, Mexico* 153


Cuauhtémoc Franco Ochoa  
Fernando García Paéz  
Wenseslao Plata Rocha  
José Miguel Montoya Rodríguez  
Miguel Ángel Vergara Sánchez

*Analysis of production decline for reservoir  
characterization* 171

Alfonso Aragón-Aguilar  
Víctor Arellano-Gómez  
Rosa María Barragán-Reyes  
Pedro Guido-Aldana

*Early estimation of the wheat crop yield in irrigation  
district 038, Río Mayo, Sonora, México* 225

Enrique Palacios-Vélez  
Luis Palacios-Sánchez  
José Luis Espinosa-Espinosa

 **Contenido** **Contents****Notas***Notes*

Cuantificación de la constante de desoxigenación por  
demanda bentónica del Río Tercero (Ctalamochita),  
Provincia de Córdoba, Argentina  
María Laura Chalimond  
Marina Ferreyra  
Ana María Cossavella

*Measurement of sediment oxygen demand rates for  
benthic demand of Tercero (Ctalamochita) River,  
Córdoba province, Argentina  
María Laura Chalimond  
Marina Ferreyra  
Ana María Cossavella*

**241**

Experimentos de equilibrio de lechos fluviales de arena  
y grava  
Juan P. Martín-Vide  
Francisco Núñez-González

*Flume experiments on the equilibrium of sand-gravel  
bed rivers  
Juan P. Martín-Vide  
Francisco Núñez-González*

**260**

**Normatividad, gestión pública del agua y  
ambientalismo de mercado en México: un análisis  
desde los proyectos políticos (2012-2018)**

**Regulation, public water management and market  
environmentalism in Mexico: An analysis from political  
projects (2012-2018)**

Daniel Tagle-Zamora<sup>1</sup>

Alex R. Caldera-Ortega<sup>2</sup>

Mario E. Fuente-Carrasco<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Estudios Sociales, Universidad de Guanajuato, México, datagle@ugto.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6203-7429>

<sup>2</sup>Departamento de Gestión Pública, Universidad de Guanajuato, México, arcaldera@ugto.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7609-8724>

<sup>3</sup>Universidad de la Sierra Juárez, México, fuente@unsij.edu.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8420-147X>

Autor para correspondencia: Daniel Tagle Zamora,  
datagle@yahoo.com.mx

## Resumen

El presente documento tiene por objetivo caracterizar las premisas e implicaciones que se han dado en torno al debate sobre la gestión del agua en México durante el sexenio 2012-2018, a través de las categorías de proyectos políticos y ambientalismo de mercado. En este proceso se identifica una disputa entre dos proyectos políticos por la definición del agua como un asunto de interés público. El primero

subordina —desde el uso de la democracia representativa— dicho interés a una perspectiva de favorecer el uso del agua para el crecimiento económico. El segundo trata de un proyecto político heterogéneo identificado como “desde abajo”, que se resiste a los procesos de privatización y mercantilización del agua, colocando como prioritario el derecho humano inscrito en el artículo 4 de la Constitución mexicana. La aproximación metodológica se realiza a partir de una técnica cualitativa denominada análisis del discurso. El artículo revisa el debate que se dio en torno a la propuesta de iniciativa de Ley de Aguas Nacionales. Asimismo, se identifican los 10 Decretos de Reservas de Agua publicado por el Ejecutivo Federal en junio de 2018; ambos casos se presentan como emblemáticos del debate nacional en torno a la gestión del agua en México. La revisión caracteriza el dominio del proyecto político neoliberal en la gestión del agua, el cual trata de enfocar el uso del líquido como insumo de megaproyectos bajo un discurso que incluso utiliza como retórica el propio derecho humano al agua y a un equilibrio ambiental.

**Palabras clave:** mercados de agua, proyectos políticos, derechos humanos, ley general de agua, decretos de reserva.

### **Abstract**

This document aims to characterize the premises and implications that have been given around the debate on water management in Mexico during the sexennium 2012-2018, through the categories of political projects and market environmentalism. In this process, a dispute between two political projects is identified for the definition of water as a matter of public interest. The former subordinates —from the use of representative democracy— such interest to a perspective of favoring the use of water for economic growth. The second deals with a heterogeneous political project identified as "from below" that resists the processes of privatization and commodification of water, placing as a priority the human right inscribed in article 4 of the Mexican Constitution. The methodological approach is based on a qualitative technique called discourse analysis. The article reviews the debate that took place around the proposed National Water Law initiative. Likewise, the 10 Decrees of Water Reserves published by the Federal Executive in

June 2018 are identified; both cases are presented as emblematic of the national debate on water management in Mexico. The review characterizes the domain of the neoliberal political project in water management, which tries to focus on the use of liquid as an input of mega projects under a discourse that even uses as rhetoric the human right to water and an environmental balance.

**Keywords:** water markets, political projects, human rights, general water law, reserve decrees.

Recibido: 03/08/2017

Aceptado: 09/07/2018

## Introducción

La sociedad mexicana se enfrenta ante una coyuntura en la disputa por el impulso de diversos modelos de gestión del agua. La publicación en el Diario Oficial de la Federación de 10 Decretos (6 de junio de 2018) (DOF, 2018) para el levantamiento de veda y la declaración de reservas en 295 cuencas de las 757 cuencas del país (que equivalen a 55% de lagos y ríos del territorio nacional) ha colocado de nueva cuenta las potenciales confrontaciones entre el uso del líquido hacia el derecho humano, ecológico y económico. Tales decretos se convierten ahora en ejemplos emblemáticos del debate nacional existente en las últimas tres décadas, cuyo inicio de proceso político se puede ubicar en la creación de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) en 1989.

Durante la administración federal de Enrique Peña Nieto (2012-2018) se pueden identificar, al menos, dos coyunturas críticas de esta disputa. Por una parte, está el contexto de las reformas estructurales (sobre todo la energética) y su derivación en la iniciativa de una nueva Ley General

de Aguas (LGA) en 2015, y los actuales decretos presidenciales de levantamiento de vedas para reserva en junio de 2018.

En el fondo, estas acciones de política pública presentan un modelo que subordina la gestión del agua a la agenda de la política económica desde diversas áreas, siendo una de ellas la promoción de esquemas de concesiones para diversos megaproyectos de la iniciativa privada —y el consiguiente uso de instrumentos de mercado—. Desde el punto de vista económico, el esquema se ha justificado como el mecanismo más eficiente e idóneo para realizar los procesos de asignación de agua, al igual que como un asunto de interés público, en función a su contribución al crecimiento económico. Para diversos autores, como Toledo (2016), se trata de impulsar proyectos de inversión en áreas como la maquila automotriz, minería y extracción de gas (*fracking*), todos ellos con grandes requerimientos de agua, que dependen de la articulación con megaproyectos hidráulicos como principales fuentes de abastecimiento y el desarrollo de mercados para la reasignación del agua hacia los usos que generan mayor valor agregado.

Un punto de inflexión en el debate nacional para la gestión del agua se dio en 2013, cuando la Conagua emprendió diversas reuniones con el Poder Legislativo e interlocutores “sociales”, principalmente empresariales, para promover la propuesta de iniciativa de la LGA, llamada Ley Korenfeld (ver Caldera, 2017). Es en 2015 cuando el dictamen del proyecto de decreto de la LGA se publica en la Gaceta Parlamentaria de la Cámara de Diputados (aprobada en comisiones en lo general por PRI, PAN, PVEM y Nueva Alianza) (Gaceta Parlamentaria, 2015). Este intento de reforma a la Ley de Aguas Nacionales (LAN) representó la forma en cómo el gobierno federal, a través de la Conagua, pretendió consolidar el paradigma “mercantil-ambiental,” que ya se venía gestando desde la década de 1980 (Aboites, 2009), pero que encontró una barrera creada desde las diferentes movilizaciones de resistencia frente a megaproyectos de agua, por parte de organizaciones de la sociedad civil y la academia, obligando al gobierno federal a posponer de manera indefinida la nueva LGA. Si bien todo indicaba que la administración federal relegaría el tema de la LGA a la administración entrante en diciembre de 2018, el escenario dio un giro inesperado en junio de ese mismo año con la firma de los referidos Decretos de Reserva de Agua (DRA) (DOF, 2018).



Esta arquitectura institucional de la gestión del agua, basada en el sistema de mercado, presenta hoy un componente de alta relevancia en el debate nacional entre distintos proyectos políticos. El impulso del proyecto político neoliberal en México se ubica a inicios del decenio de 1980 con diversos ajustes estructurales y reformas del Estado, pero se intensifica durante la administración de Peña Nieto con la Reforma Energética. El llamado "Pacto por México", avalado por los representantes del poder legislativo de los tres principales partidos políticos (PAN, PRI y PRD), aprobó las reformas estructurales, para favorecer el uso del mercado como eje rector en los principales sectores de la economía mexicana.

Situados en este debate contemporáneo nacional, el artículo tiene por objetivo identificar y caracterizar las premisas e implicaciones que se dieron en la gestión del agua durante el sexenio de Enrique Peña Nieto (2012-2018), como un debate entre diferentes proyectos políticos por imponer/resistir las premisas del mercado. Se destaca, por un lado, la disputa por los modelos de gestión del agua, la cual no es ajena a la discusión de la transformación del Estado en favor de la aparición de las instituciones de mercado.

El documento se estructura de la siguiente manera. El primer apartado explicita los criterios metodológicos del abordaje. El segundo considera los referentes analíticos de "proyectos políticos" y "ambientalismo de mercado", los cuales caracterizan los proyectos e intereses en conflicto por el agua. El tercer apartado hace la narrativa de los conflictos por la gestión del agua con base en la estructura teórica y metodológica previamente señalada. Por último, se presentan las conclusiones y referencias bibliográficas.

## **Abordaje metodológico**

La aproximación metodológica se realiza a partir de la técnica cualitativa denominada análisis del discurso, la cual implica una relación particular entre la instancia de la construcción teórica y la instancia de la

operación empírica, en la que se reconocen de manera explícita los presupuestos y prescripciones éticas; de ahí su asociación “a una perspectiva específica sobre la construcción y el procesamiento de los datos” (Sayago, 2014). Se trata de un método hermenéutico. Con el análisis del discurso se exploran las relaciones entre los textos y la realidad, para procurar hacer visibles los discursos desde sus puntos de origen, así como la identificación del contexto en el que se expresan los lenguajes de los actores (Urra, Muñoz, & Peña, 2013), que en este caso se expresa en el discurso de la gestión pública del agua.

Desde esta perspectiva, se identifican dos componentes. El primero es el que presenta el carácter más concreto o empírico, consistente en una descripción de las principales acciones de política pública realizadas por el gobierno mexicano en materia de política pública hídrica. Se enfatiza la recopilación de información a partir de dos tipos o fuentes de información: a) el discurso expresado en registros escritos de una manera explícita, como es el caso de los documentos de tipo jurídico como leyes, iniciativa de leyes, expedición de decretos vinculados con el tema de la gestión del agua en particular y de la política económica en general; b) el contexto, es decir, el texto dentro de un conjunto de relaciones de poder entre actores sociales, en este caso dentro de intentos de reforma del marco normativo de la gestión del agua en México en el último sexenio (2012-2018). El segundo componente metodológico se da en un nivel más abstracto a partir de la identificación de diferentes categorías ordenadoras. En este caso, son dos las categorías centrales: la de proyectos políticos y la de ambientalismo de mercado. La categoría de proyectos políticos ofrece elementos para abordar el entendimiento del proceso actual de crisis política del agua (Caldera & Torregrosa, 2010; Caldera, 2015), enmarcado por el desencuentro entre sociedad y Estado mexicano por la promoción de este último hacia las instituciones de mercado. Por su parte, la categoría de ambientalismo de mercado permite explicitar las premisas y nociones de la mercantilización del agua involucrada en el proyecto neoliberal. Como señala Bakker (2005), el ambientalismo del mercado consiste en trasladar los recursos naturales a la esfera del propio mercado, definiéndolos como bienes económicos y manejándose bajo estas reglas para su asignación. Las categorías privatización, comercialización y mercantilización son clave para definir los avances

del proyecto neoliberal, siendo la mercantilización aquella categoría (más avanzada y radical) que concreta el sistema de mercados, incorporando los recursos naturales en su propia lógica.

Este tipo de abordaje metodológico permitió precisar el papel activo de los actores y componentes de tensión político-económico que plantea el neoliberalismo bajo su proyecto de ambientalismo de mercado para el eje agua.

En la siguiente sección se abordarán las premisas teóricas desde las cuales se aborda el discurso (registros) del sector gubernamental, en donde ha dominado la tendencia mercantilizadora del agua bajo lo lógica neoliberal.

## **Orientación analítica**

### **Proyectos políticos**

El concepto “gobernanza” tiene un uso reciente (no siempre homogéneo o coincidente) para hacer referencia al cambio en el patrón de dirección de la sociedad en la gestión de lo público; se hace desde un continuo variante de posiciones con respecto a la profundización de la democracia en torno a las relaciones entre Estado, sociedad y mercado (Caldera, 2015).

El concepto ha sido utilizado para describir el hecho de que varias políticas sociales y servicios públicos han empezado a llevarse a cabo mediante fórmulas que no sólo incluyen la responsabilidad del gobierno, sino con la acción y participación de agentes económicos y sociales diversos (Aguilar, 2006). Sin embargo, el espectro de posiciones, sistemas de creencias y concepciones del mundo es variante y, la mayor de las veces, en conflicto por los intereses económicos en juego.

El interés por los proyectos políticos es la atención en el proceso subjetivo y social asociado e identificado como las “creencias programáticas” que operan en el espacio entre las visiones del mundo y las ideas específicas sobre las políticas públicas que tienen los actores involucrados en un asunto público (en este caso, la gestión del agua); son los “núcleos de política pública” que proveen conjunto de diagnósticos y prescripciones para la acción para los actores involucrados en la gestión del agua. Esta forma de explicar las creencias y los deseos de los actores es la descripción de las teorías que los agrupan y los articulan en un conjunto de entendimientos del mundo, es decir, configura proyectos políticos que serán la bandera a defender en el diseño de las políticas y en la búsqueda de sus resultados (Dagnino, Olvera, & Panfichi, 2006: 39).

Estas posiciones se pueden entender como “proyectos políticos” en disputa, en torno a la constitución de lo público (donde obviamente está el diseño de mecanismos para la asignación y distribución de bienes escasos, como el agua). Los proyectos políticos son entendidos por Dagnino, Olvera y Panfichi (2006: 43), como el “conjunto de preferencias, intereses, concepciones del mundo y representaciones de lo que debe ser la vida en sociedad, los cuales orientan la acción política de los diferentes sujetos”. El tipo de vínculo que se establece entre sociedad política y sociedad civil está en relación directa con la coincidencia de los proyectos políticos existentes, que pueden ser — dada la experiencia latinoamericana— o de tipo autoritario, neoliberal, o democrático-participativo.

En este trabajo se caracterizaron dos proyectos políticos referidos al enfoque de gobernanza del agua. Se trata de proyectos que disputan “la construcción democrática” del presente y futuro de nuestros países, así como los paradigmas de entendimiento de las posibilidades de las relaciones Estado-sociedad, y de éstas con el medio ambiente a través de los recursos hídricos.

La primera de las vertientes es la ligada al proyecto “neoliberal”, que ve la reforma del Estado como una transformación “desde arriba”, con una sociedad sólo tomada en cuenta en su dimensión de cliente, consumidor de bienes escasos o competidor en torno a usos en búsqueda de la eficiencia en la gestión del agua. En el otro lado del espectro está el proyecto político “democrático-participativo”, que busca reconocer los

propios límites de la democracia representativa, las potencialidades de la comunidad como posibilidad de la sostenibilidad de interdependencias no mercantiles (Santos, 2004), y un equilibrio de relaciones entre ésta y el medio ambiente a través una naturalización del acceso al agua para la vida.

En los últimos treinta años ha habido un debate intenso sobre la mejor forma de "gobernanza del agua" bajo este esquema de disputa entre proyectos políticos (Caldera & Torregrosa, 2010). En este periodo se identifica el enfrentamiento claro de dos coaliciones de defensa a partir de su concepción de la naturaleza del agua: por un lado, la coalición que promueve la visión del agua como un bien económico (ligada al proyecto neoliberal) y al mercado como mejor instrumento de asignación; y, por otro, la coalición que identifica al agua como un bien social o común, como un derecho humano (expresión del proyecto democrático-participativo).

Si bien el esquema de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) ha logrado hacer coincidir a una variedad de actores sobre sus ventajas, la discusión en torno a los instrumentos y la estructura de funcionamiento y resultado suele ser parte de las tensiones para la formulación de políticas públicas. Hay coincidencias entre la mayoría de los actores que la gestión a nivel de cuencas es la más adecuada para lograr mejores objetivos de desarrollo y conservación medioambiental, pero las diferencias y disputas están determinadas por las visiones núcleo en torno a la naturaleza del agua. La GIRH en este sentido, más que ser una discusión meramente técnica, es también esencialmente política, a partir de los fines que se le atribuyen. La disputa en este nivel está en torno al nivel de la descentralización en el proceso de toma de decisiones e intervención de instancias locales frente a la administración centralizada y el alcance de la participación social.

Por un lado, el proyecto político neoliberal parte de la visión del agua como bien económico, lo que hace que la GIRH se entienda como el mejor instrumento para crear mercados de agua, donde actores de usos competitivos buscan la asignación del recurso escaso más eficiente. Se entiende que los derechos de propiedad sobre el agua deben ser preferentemente privados o la gestión de los servicios conexos debe ser manejada bajo premisas del mercado. El manejo en el nivel de cuenca permite el cuidado de los recursos naturales en tanto capital (recurso o

bien productivo) para el desarrollo sostenido de la región (Bakker, 2005). La gestión en nivel de cuenca se ve como un espacio en el que se pueden crear condiciones de “buena gobernanza”, es decir, esquemas de cooperación y asociación tripartitas (Estado, mercado y sociedad civil), y participación de la sociedad de forma acotada, para atacar la crisis del agua y producir futuros deseados. Bajo esta concepción, el gobierno central debe procurar el control de las asignaciones, buscando esencialmente eficiencia, así como los principios y lineamientos de política a ser implementados en nivel de cuenca, para facilitar el intercambio competitivo entre usos, donde los involucrados, esencialmente usuarios con derechos de propiedad, participan de manera complementaria.

Mientras el proyecto político democrático-participativo parte de una visión del agua como bien social o derecho humano, la GIRH se promueve principalmente como un medio en el que la propiedad pública del bien se materializa en nivel cuenca, subcuenca o acuífero, y que bajo los principios de equidad y justicia social, la asignación del agua se destina en primera instancia para cubrir necesidades básicas humanas, aliviar las condiciones de pobreza, conservar el medio ambiente, cubrir el uso comunitario y no es sólo un insumo más para el desarrollo económico de la cuenca (Arrojo, 2006). El cuidado del medio ambiente en nivel de cuenca parte de un compromiso intergeneracional para las sociedades futuras. El manejo de la cuenca debe estar garantizado por instancias públicas, o básicamente de carácter social, sobre todo del nivel regional y local de gobierno que gocen de amplia legitimidad democrática y se conduzcan bajo principios democráticos. Se reconocen las capacidades de influencia diferenciales de los usuarios, y el aparato gubernamental asegura los equilibrios. El gobierno local, junto con la comunidad, deben ser los responsables de la gestión del agua, involucrándolos en el diseño de reglas, la supervisión de comportamientos oportunistas de los usuarios y el establecimiento de sanciones (Ostrom, 2000).

La base de la disputa es entre ser un “ciudadano del Estado” o un “ciudadano del mercado”. El proyecto político neoliberal (agua como bien económico) en este periodo ha logrado cierta hegemonía, respaldada por la capacidad de influencia de empresas multinacionales que se comprometen con este proyecto político, e incluso de una

mayoría de gobiernos, tanto desarrollados como en vías de desarrollo, que se apegan al modelo de desarrollo neoliberal. Las técnicas utilizadas por la coalición apegada al proyecto político neoliberal que explican su efectividad durante este periodo incluyen no sólo la argumentación en pro de liberalizar los mercados del agua y asignar derechos de propiedad, sino incluso llegan a utilizar las categorías de derecho humano al agua para justificar megaproyectos de extracción, almacenamiento y conducción del agua para operarlos a través de privados y obtener beneficio parcial para la comunidad.

En este sentido, se reconoce que las instituciones del agua son tanto el resultado como el vehículo de procesos políticos, los cuales han moldeado el cambio institucional y sus resultados en la gestión del agua (Castro *et al.*, 2006). Los procesos políticos son relativos al ejercicio de poder y pueden ser mejor entendidos si se remiten a un proceso de enfrentamiento entre proyectos políticos rivales en torno al entendimiento mismo de la crisis del agua (entendida como acceso inequitativo, escasez y contaminación) y las estrategias para hacerle frente, es decir, las políticas públicas.

En ese tenor, los temas relativos a la gobernanza del agua que resultan más disputados son: (a) ¿bajo qué principios se logra el mejor gobierno del agua?; (b) ¿cómo lograrlo? ¿Con quién?; (c) ¿con qué objetivos? ¿Con qué programas y proyectos?

Los proyectos políticos se toman como “tipos ideales” de lo que defienden los actores en un momento determinado, a partir de su concepción de la naturaleza del agua, del entendimiento que se tenga del origen o causas de los problemas, así como de las soluciones y sus estrategias que se planteen como las más adecuadas para superar la crisis del agua. La observación tanto de los proyectos políticos defendidos por cada conjunto de actores, y las asimetrías de poder en el desarrollo institucional, y el desempeño de las políticas públicas se convierte en básico para un buen entendimiento del proceso de gobernanza (Tabla 1).

**Tabla 1.** Configuración como tipos ideales de los proyectos políticos defendidos por los actores en el proceso de gobernanza del agua. Fuente: Caldera & Torregrosa (2010).

<b>Agua como bien económico</b>	<b>Agua como derecho humano</b>
El agua es un bien económico y el mercado el mejor instrumento para la asignación eficiente.	El agua es un derecho universal e inalienable, constitutivo de la dignidad humana, su asignación debe estar gobernada por principios de equidad y justicia social.
Se deben solucionar los problemas de asignación entre usos competitivos, procurando el cuidado de los recursos naturales en tanto bienes económicos escasos.	Se deben solucionar los problemas de inequidad en el acceso al agua, superación de la pobreza y asegurar la sustentabilidad de los recursos naturales en un compromiso intergeneracional.
Instrumentos por cuencas es un medio para estructurar eficientemente los mercados de agua e introduce incentivos para el cuidado del medio ambiente.	La gestión por cuenca es un medio que permite la participación democrática y la asignación justa del agua. Además trasparenta y sanciona las posibles acciones oportunistas de los actores.
La participación se da en asociaciones público-privadas. Los mercados de agua existen en nivel de cuenca. Son necesarios los derechos de propiedad (privada) sobre el agua.	La sociedad civil asegura participación y control democrático sobre el manejo del agua. Debe asegurarse la propiedad pública del agua.

El reconocimiento de la disputa a partir de proyectos políticos defendidos en la construcción de las instituciones del agua se debe dar en los diferentes órdenes de interacción entre actores protagonistas del debate, diseño y adopción de las políticas. Se trata, a fin de cuentas, de implementar acciones para hacer frente a los principales problemas relativos a la escasez, distribución, calidad, aprovechamiento y garantía de acceso al agua.



Los atributos desglosados en la Tabla 1 permiten emitir una serie de reflexiones analíticas de alto interés en la confrontación de modelos de gestión sobre un ente de interés público: el agua. Es necesario matizar que no se trata de impulsar la emisión de juicios de valor con sesgo entre un modelo bueno *versus* malo. En este sentido, tampoco se rechaza la importancia del agua como un insumo relevante en el desarrollo económico y de la sociedad. Más bien, se impulsa una reflexión sobre el tipo de decisiones dadas en la sociedad para definir las implicaciones y distribución de los costos y beneficios de tipo éticos, ambientales e institucionales entre modelos de gestión. De manera concreta, lo que se cuestiona es la implicación de un fundamentalismo de mercado como criterio para fijar los fines de la sociedad. Es decir, se pone en alerta sobre las implicaciones de una gestión del agua (velada o explícita) en la que se subordinen los criterios de equidad y justicia social (p. ej., el derecho humano al agua) por el predominio de la función del agua como insumo para la acumulación de capital. En otras palabras, las implicaciones en la definición de las reglas para transferir los costos de la extracción (uso y descargas) del agua hacia la sociedad y el ambiente, pero con una concentración de beneficios económicos de manera individual.

Se está colocando como punto central del debate que la construcción de un modelo de gestión del agua se despliegue a partir de ciertos principios que promuevan los siguientes componentes:

- a) El reconocimiento de la existencia de la sociedad de un conjunto de valoraciones diferenciadas del agua, desde los de tipo cultural (cosmovisión), pasando por los del derecho humano al agua, hasta los de tipo económico.
- b) La importancia de construir mecanismos de tomas de decisión (reglas) a partir de un ejercicio democrático más deliberativo. Durante las décadas pasadas, el uso de la democracia representativa ha sido necesaria, pero insuficiente y muy limitada.
- c) Definir de manera consensuada las prioridades en el uso y acceso del agua: mantener niveles superiores al estrés hídrico, asegurar la cantidad y calidad, y acceso y disponibilidad del agua para consumo humano de forma equitativa.

El resultado superior tanto para materializar el derecho humano al agua como la sustentabilidad medioambiental se ligó al proyecto político democrático participativo por las razones que el propio Sen (2001) valoraba en la misma democracia para conseguir resultados positivos para el desarrollo humano y bienestar social: primero, la libertad política es componente fundamental de la libertad humana en general, y el ejercicio de los derechos políticos y civiles son cruciales para que los mismos ciudadanos exijan sus derechos sociales; segundo, la democracia participativa adquiere valor porque ayuda a los ciudadanos no sólo para expresar sus necesidades y perspectivas en ese sentido y lograr la atención del aparato de gobierno, sino para colaborar en la materialización, implementación o visibilización de las inequidades, o identificación precautoria de resultados negativos, en términos del interés público.

A continuación se presenta el fundamento teórico respecto a las implicaciones de la estructura de un sistema de mercados como parte del proyecto neoliberal, componente necesario para precisar la naturaleza del desencuentro entre proyectos políticos en el sector agua.

## **El ambientalismo de mercado como referencia del proyecto neoliberal: fundamentos ideológicos y teóricos**

El inicio de la ola neoliberal en la década de 1980 trajo consigo un proceso aguerrido por implantar el sistema de creencias basado en la piedra de toque que identifica al mercado como la opción idónea ante la incapacidad mostrada por los diferentes gobiernos de los países en vías de desarrollo (sea por incapacidad o corrupción). Las recurrentes crisis económicas, con altos niveles de endeudamiento e inflación, evidenciaron la ineficiencia de los gobiernos de participar como proveedores de bienes y servicios ante las exigencias de las agencias internacionales. Se justificó de dicha forma la participación del sector privado en sectores estratégicos antes prioritarios del Estado. Es así

como el sector agua, uno de los de mayor interés para el neoliberalismo, tuvo la incursión del sector privado a través de: a) la concesión de servicios municipales de agua potable y saneamiento; b) el desarrollo de infraestructura hidráulica con dinero público para el abastecimiento de agua, y c) el desarrollo de mercados para la gestión del agua (Barreda, 2006; Arrojo, 2006; Balanyá, Brennan, Hoedeman, Kishimoto, & Terhorst, 2005; Castro, 2012).

Durante el decenio de 1990 y principios del nuevo milenio se afirma existe una insatisfacción generalizada con las modalidades de asignaciones tradicionales de agua y de los costos erogados por el Estado, de ahí que se vea como necesario intensificar el uso de los mercados como un mecanismo eficiente frente a la gestión estatal, ya que promete un uso más eficiente —en términos económicos— del “recurso hídrico” (Donoso, Jouravlev, Peña, & Zegarra, 2004: 5).

El discurso y la presión institucional neoliberal permitieron así la incorporación del instrumento de mercado en diferentes países, sobre todo Chile y España, casos considerados como emblemáticos por el Banco Mundial (BM) (Aguilera 2008), incluso desplazando otros instrumentos de política de demanda, como la tarifación o modernización de la infraestructura, colocando así al mercado como el instrumento predilecto de los gobiernos neoliberales.

En este sentido, el mercado se concibió como el “ámbito” institucional donde se definen las responsabilidades de los usuarios y se solucionan sus conflictos, esperando que dicho mecanismo estableciera una mejor asignación, mejorando la eficiencia del uso y racionalizando el consumo de este recurso. Con respecto a su valor, se consideró que éste debe estar asociado con su *costo de oportunidad* y presencia física dentro de la cuenca hidrográfica (Donoso *et al.*, 2004; Colby, 1988; Lee & Jouravlev, 1998). En tales condiciones, entonces, podría tomar incluso valores para los diferentes usos, en función del cambio de la calidad y cantidad, de la época del año y de situaciones hidrológicas extremas, fueran éstas favorables o desfavorables (Fortis & Alhers, 1999).

La aplicación de los instrumentos de mercado requiere del abordaje de las diversas condiciones teóricas necesarias para alcanzar la eficiencia óptima del recurso. A continuación se señalan las mismas para valorar la estructura de la discusión en términos de categorías, que son a las

que los actores apelan frente a la incorporación del mercado en la gestión del agua.

## **Mercados de agua: definición y condiciones**

Desde los postulados teóricos, un modelo de gestión del agua basado en el mercado implica que la asignación se dé con base en un precio determinado mediante el libre intercambio de algún tipo de título de propiedad (derecho, permiso, concesión, autorización, merced, etc.) para usarla e intercambiarla. Son entonces las interacciones entre compradores y vendedores de estos títulos las que constituyen un mercado de agua (Donoso *et al.*, 2004).

Para que esta institución tenga los resultados deseados, en materia de gestión de agua, requiere de la definición clara y precisa de las reglas del juego en su estructura institucional, así como de una serie de condiciones económicas y sociales en un contexto de mínima intervención estatal, esto como condición indispensable para conseguir una asignación eficiente del agua (ver Lee & Jouravlev, 1998; Donoso *et al.*, 2004; Simpson & Ringskog, 1997).

Dentro del esquema neoliberal, sus proponentes señalan fines de tipo ambiental y económico para introducir los mecanismos de mercado en la gestión de recursos naturales, lo que se conoce como *ambientalismo de mercado* (Anderson & Leal, 2001). Se busca sean las señales del mercado las que compatibilicen crecimiento económico, eficiencia y conservación ambiental (Hajer, 1995). Dentro de esta esfera neoliberal, Bakker (2005) señala tres conceptos base que constituyen el proceso para construir este ambientalismo de mercado para el caso del agua, es decir, trasladar el agua de bien común al agua como bien económico:

- *Privatización* implica un cambio de propiedad o una transferencia en la gestión del recurso del sector público al privado.

- *Comercialización* implica cambios en las prácticas de la gestión del recurso, incorporando principios (eficiencia), métodos (evaluación costo-beneficio) y objetivos (máxima ganancia) (Leys, 2001).
- *Mercantilización* implica la creación de un bien económico a través de la aplicación de mecanismos de apropiación y estandarización, bienes o servicios, permitiéndole a estos últimos ser intercambiados a un precio determinado en el mercado bajo los principios de la eficiencia económica.

Estas últimas categorías se vuelven centrales para comprender la lógica de la gestión del agua en el esquema neoliberal; constituyen un proceso de ambientalismo de mercado siempre y cuando se culmine la mercantilización del agua, es decir, ésta sea intercambiada bajo los principios de eficiencia en el sentido de Pareto como cualquier otro bien económico. Se subraya que hay una diferencia analítica de fondo entre la mercantilización con la comercialización y la privatización, lo cual no debe confundirse, y aunque el agua logre privatizarse o comercializarse, esto no implica que se culmine el proyecto neoliberal (Bakker, 2005).

Una vez definido el marco de referencia, se procede en el siguiente apartado al abordaje del conflicto de la gestión del agua en México para el sexenio 2012-2018, a través de una narrativa sustentada en el enfoque recién planteado.

## **La narrativa del desencuentro en la gestión del agua en México**

### **Las coyunturas críticas del sexenio 2012-2018**

Desde diciembre de 2012, y en los posteriores 20 meses, se dio un proceso de aprobación de 11 reformas bajo el acuerdo político citado

"Pacto por México", entre las que destacan las reformas energética, fiscal, laboral, financiera y educativa.

El año 2015 fue testigo de una fuerte confrontación de la sociedad civil frente al impulso del proyecto político neoliberal que presentó la propuesta de reforma a la LAN, a través de una nueva LGA. Uno de los puntos focales de tal desencuentro frente al poder legislativo derivó por la presentación de una iniciativa que pretendió mimetizar el proceso de mercantilización del agua orientado a diversos megaproyectos a través de la figura de un supuesto derecho humano del agua. La respuesta reactiva ante tales intentos puede ser considerada como parte de una de las diversas demandas por una gestión social y ambiental del agua empujadas "desde abajo".

Los antecedentes de estas demandas "desde abajo" son diversas. Una de ellas se remite al largo proceso iniciado desde 2006, en donde la Coalición de Organizaciones Mexicanas para el Derecho Humano al Agua (Comda), exigía incluir constitucionalmente el acceso en calidad y cantidad de agua como derecho humano. Esta demanda tuvo un catalizador internacional importante: en 2010, el pleno de la Asamblea de la ONU reconoció el derecho humano al agua (Resolución 64/292).

Desde estas consideraciones internacionales, el gobierno mexicano se comprometió a incluir tales demandas en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, lo cual se concretó el 8 de febrero de 2012, con la reforma al artículo 4º, para quedar como sigue:

"Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines" (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2015).

Posteriormente, los artículos transitorios de esta reforma implicaban que en el lapso de un año se debía promulgar una nueva LGA en sustitución de la vigente LAN. Sin embargo, la presión política por la sensibilidad del tema detuvo el proceso (partidos de izquierda, como el PRD, Movimiento Ciudadano y PT, incluso participantes de Morena, dejaron la sesión del

pleno que la votaría; también había un acompañamiento de diversos movimientos sociales que en ese momento se resistían a megaproyectos por el acueducto Independencia en Sonora, o el Monterrey IV en Nuevo León y Tamaulipas, así como instituciones académicas, como la propia Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en voz de su rector). Tres son los principales componentes de la LGA que llamaron fuertemente la atención de estos actores, detonando en una presión para detener la aprobación de la iniciativa:

1. La apertura para colocar la priorización de un uso del agua como insumo para el desarrollo de proyectos económicos, y la promoción de la participación de la iniciativa privada en la construcción, operación y gestión de obras (trasvases, pozos ultra-profundos y desalinizadoras) y servicios de agua potable y saneamiento. Destaca, por ejemplo, la permisividad en torno a la práctica del *fracking* (o fractura hídrica) tanto para la extracción minera como de gas. De forma previa, la reforma energética, promovida un año antes por el presidente Enrique Peña Nieto, ponía condiciones de “facilitación” para fuertes inversiones privadas en este sector; en este sentido, el tema fue de especial atención por varios grupos que venían oponiéndose.
2. La conceptualización del derecho humano al agua, la cual limita a la autoridad competente a garantizar la dotación a los asentamientos humanos de 50 litros diarios por persona. El problema identificado es que la obligación es para usuarios conectados a una red hidráulica o, en su caso, a habitantes que no viven en áreas urbanas irregulares. Un antecedente relevante en este punto es la resolución en Amparo que la Suprema Corte había resuelto (Revisión 2190/2014), en la que se da la sentencia en el sentido de que la cantidad diaria obligada debía ser de 100 litros por persona. Ligada a este punto, la iniciativa de proyecto de ley excluyó el reconocimiento de las dimensiones sociales y físico-naturales del derecho humano relacionadas con los usos culturales (identitarios-étnicos) y medioambientales.
3. La disposición de regulación de los estudios técnicos y científicos sobre disponibilidad y calidad del agua a través de la propia Conagua. Esto generó la atención de la comunidad científica, en particular de la UNAM, la Universidad de Guadalajara (UdeG) y la Universidad Autónoma

Metropolitana (UAM), cuyos rectores respaldaron a su comunidad, firmando desplegados dirigidos a los legisladores a abrir el debate y discusión en torno a la nueva Ley General de Aguas.

Alternó al proceso del gobierno federal, y desde dos años previos, organizaciones de la sociedad civil, en conjunto con investigadores y ciudadanos, se dieron a la tarea de analizar, discutir y elaborar de modo colectivo una propuesta alterna (y etiquetada como ciudadana) de LGA (Agua para Todos, 2015) (Tabla 2). La propuesta iba cobijada por décadas de experiencias en investigación y acción, y con una claridad de desarrollar una gestión sustentable, y en defensa de las cuencas y sus aguas. Estos actores, agrupados en la llamada Coalición Agua para Todos, presentaron ante las cámaras de diputados y senadores la propuesta ciudadana, argumentando que la propuesta del gobierno presentaba los siguientes problemas:

1. Promueve la privatización del agua, al considerarla principalmente un bien económico y no un bien cultural y social.
2. Promueve el desplazamiento de personas y la muerte de los ríos.
3. Amplía los márgenes para poder contaminar el agua.
4. Restringe, condiciona y sanciona los estudios, la investigación científica y el monitoreo del agua (Córdova, 2015).

La propuesta ciudadana dice plantear las bases para materializar el artículo 4° constitucional (Gaceta Parlamentaria, 2015). El documento de la propuesta pone el acento en garantizar el acceso equitativo y sustentable al agua a través de mecanismos, instancias e instrumentos de planeación, gestión y contraloría ciudadana, con base en el principio de derechos sociales, culturales y ambientales.

**Tabla 2.** Comparación de propuestas de Ley General de Aguas. Fuente: Agua para Todos, 2015.

Temas	Iniciativa Conagua	Iniciativa ciudadana
-------	--------------------	----------------------



De dónde vendría el agua	Grandes obras intensivas en energéticos, privadas, en torno a grandes ciudades: trasvases, acuíferos ultra-profundos, desalinizadores; además de ríos y acuíferos sobreexplotados	Restauración y gestión integral de cuencas.
El derecho humano al agua	<p>“El derecho humano al agua comprende la obligación de la autoridad (...) de garantizar a los asentamientos humanos el mínimo vital, que se otorgará con la periodicidad que permita la dotación equivalente a cincuenta litros diarios por persona”.</p> <p>Se institucionaliza la política de pipas.</p>	<p>La Contraloría Social del Agua, ciudadana y autoorganizada realizaría monitoreo ciudadano, con financiamiento público, del acceso equitativo a agua de calidad.</p> <p>El Fondo Nacional por el Derecho Humano al Agua financiaría sistemas autogestionados en zonas sin acceso, como prioridad nacional.</p>
Privatización del agua	<p>Las concesiones a aguas nacionales serían objeto de libre compra-venta.</p> <p>Se promovería el concesionamiento de grandes obras hidráulicas, así como de trasvases y de las aguas trasvasadas.</p> <p>Se obligaría a las autoridades municipales y estatales a promover la privatización de los servicios de agua y saneamiento vía las figuras del contrato, concesión o asociación pública-privada.</p>	El agua se consideraría un bien común, de la nación, proveniente de la naturaleza, a ser manejada por el sector público y comunitario sin fines de lucro.
Participación ciudadana	El Consejo Consultivo del Agua sería la “institución de participación ciudadana”. El Ejecutivo Federal podría solicitar opiniones de ANUR (usuarios de riego	Los Consejos Ciudadanizados de Cuenca, construidos vía participación abierta desde el nivel local, consensarían planes vinculantes para cumplir con metas nacionales.

	<p>principalmente para exportación) y ANEAS (privatizadores de sistemas municipales).</p> <p>Los Consejos de Cuenca serían efectivamente controlados por la Conagua. Los únicos "ciudadanos" garantizados con voz y voto serían las empresas concesionarias. Sus acuerdos no serían vinculantes.</p> <p>Para hacer cumplir con sus determinaciones, las autoridades podrán solicitar el auxilio de la fuerza pública.</p>	<p>Se daría reconocimiento y prioridad a los sistemas de agua potable y saneamiento organizados por pueblos, comunidades o usuarios.</p> <p>Los sistemas municipales y del DF serían administrados por consejos compuestos mayoritariamente por representantes territoriales elegidos en asambleas abiertas, con controles para garantizar equidad, eficacia y transparencia.</p>
Trasvases	<p>Se consideraría a los trasvases de "utilidad pública" y serían concesionables, junto con las aguas trasvasadas, a particulares.</p>	<p>Los Planes Rectores plantearían las obras y políticas requeridas para lograr el equilibrio en cada cuenca. Se prohibiría nuevos proyectos de expansión urbana en cuencas en extremo estrés hídrico.</p>
Prelación de usos	<p>En nombre del "derecho humano al agua" se prioriza el uso "público urbano", el cual incluye cualquier uso (industrial, construcción) del sistema de agua potable municipal o metropolitano, garantizando sólo 50 litros diarios por persona para uso doméstico.</p> <p>La explotación minera <b>no</b> requeriría de una concesión de aguas nacionales, y por lo tanto estos volúmenes no serían contabilizados ni existirán mecanismos para limitar su acceso.</p>	<p>El Consejo Ciudadano de Cuenca asignaría los volúmenes aprovechables, priorizando el uso personal (doméstico y servicios públicos) y la soberanía alimentaria.</p> <p>El Consejo de Cuenca recomendaría anualmente los volúmenes a ser destinados a usos no prioritarios (industrias, agricultura de exportación) según la disponibilidad y su importancia, para el bienestar de la cuenca y sus habitantes.</p>

Financiamiento	<p>Las tarifas cobradas a los usuarios finales obligatoriamente tendrán que cubrir el costo de recuperación de inversión (incluyendo utilidades), operación, mantenimiento y expansión de grandes obras hidráulicas aprobadas sin revisión pública, y de sistemas de agua potable y alcantarillado.</p> <p>Los tres niveles de gobierno serían obligados a destinar recursos para subsidiar las tarifas cobradas a las poblaciones más vulnerables.</p>	<p>Se financiarían obras de bajo costo y óptimos beneficios para los más marginados, a través de políticas fiscales progresivas (paga más quien tiene más).</p> <p>Se prohibiría contratos con inversionistas extranjeros que vulnerarían el país.</p>
Vigilancia, inspección y sanciones	<p>Se proponen programas voluntarios de auditoría y autorregulación. Se consideran faltas graves las contenidas en las fracciones X a XXVIII, mismas que no podrán sancionarse con multa inferior a mil días de salario mínimo.</p>	<p>La Contraloría Social del Agua, ciudadana y autoorganizada, contaría con financiamiento público para monitorear calidad y acceso equitativo, con la facultad de recomendar la revocación del mandato de autoridades incumplidas.</p>
Estudio, monitoreo y contraloría	<p>Sólo con autorización de la autoridad se podrán hacer estudios técnicos (investigación científica incluida) de disponibilidad y calidad del agua</p>	<p>La Defensoría Socio-Hídrico-Ambiental contaría con financiamiento garantizado, para poder realizar demandas desde la ciudadanía por violación de la legislación vigente.</p>

Esta disputa trajo un *impass* de más de tres años, en los que las dos iniciativas quedaron congeladas en el poder legislativo. Sin embargo, el 6 de junio de 2018, el presidente de la república publicó diez decretos de reserva de agua, que en esencia levantan la veda existente en 295 cuencas del país (DOF, 2018).

Esta medida parece ser la vía alterna que encontró el gobierno federal para asegurar el agua para los usos productivos que le demanda las

reformas del Pacto por México, que exige grandes cantidades de volúmenes de agua. Como antecedente se pueden ubicar dos: un decreto de reserva y levantamiento de veda de 2014 en la cuenca Lerma-Chapala; y durante 2017, la publicación en varios momentos en el *Diario Oficial de la Federación* de los acuerdos por los que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas implicadas en los diez decretos de los que se hace referencia para 2018.

Los diez decretos se pueden sintetizar en las siguientes medidas:

1. Se levanta la veda en aquellas cuencas donde estaban decretadas, la mayoría de ellas desde la década de 1930.
2. Se reserva parcialmente un volumen por cada cuenca para el uso público-urbano, rural o consumo humano.
3. Se reserva parcialmente un volumen por cuenca para uso ambiental o para conservación ecológica en las cuencas hidrológicas.
4. Se respetan las concesiones y aprovechamientos dados antes de la reserva, pero que se encuentren regularizados en el registro de Registro Público de Derechos de Agua (Repda).
5. Deja volúmenes disponibles, no comprometidos, por medio de las reservas parciales antes mencionadas, por lo que "se podrán explotar, usar o aprovechar mediante título de concesión o asignación previamente emitido por la Autoridad del Agua (DOF, 2018).

De inmediato las críticas por varios frentes sociales y académicos se hicieron notar a través de varios medios de comunicación que, en medio del proceso electoral presidencial de 2018, generaron la atención por parte de la opinión pública.

Las principales críticas se sintetizan en las observaciones hechas por académicos y especialistas integrados en el movimiento Agua para Todos, que de inmediato dieron a conocer sus observaciones a los decretos. Dichas observaciones se transcriben de forma parcial (Agua para Todos, 2018):

1. Los Decretos de Reserva (DOF, 2018) quitan las vedas (último vestigio del modelo anterior de gestión del agua, en manos del Estado en vez del mercado) para extender la lógica del sistema de concesiones impuesto en México a través de la Ley de Aguas Nacionales (1992) como precondition para entrar en el TLCAN, por encima y en desconocimiento de la multitud de formas de tenencia del agua y pertenencia al agua-territorio existentes en el país (ni siquiera EUA maneja sus aguas a través de un sistema único de concesiones.)

Aunque las vedas han sido violadas de forma sistemática por la Conagua a lo largo de sus 29 años de existencia, las empresas trasnacionales requieren de concesiones con seguridad jurídica, lo cual significa formalmente eliminar las vedas.

2. Aunque están siendo promovidos como una medida de protección al ambiente, incluyen reservas para uso urbano y, en algunos, para la generación de energía eléctrica (en San Pedro Mezquital reservan 2 000 millones m<sup>3</sup>/año para CFE para este uso —ahí es donde se ha estado buscando construir la presa Las Cruces, que afectaría el pueblo Nayeri— y sólo un poco más de 300 para uso ambiental).

3. Los decretos se basan en la Ley de Aguas Nacionales, la cual, según el 3er transitorio de la reforma al 4o Artículo Constitucional, tendría que haber sido reemplazada en febrero 2013 por una ley centrada en el derecho humano al agua, la cual "sentaría las bases" para la participación de la ciudadanía, junto con los tres niveles de gobierno, para la consecución del "acceso y uso equitativo y sustentable" del agua.

4. Los decretos extinguen los derechos al agua de los núcleos agrarios que no fueron renovados a tiempo. Todos los decretos contienen este lenguaje: "Las concesiones o asignaciones otorgadas con anterioridad a la entrada en vigor del presente Decreto, serán reconocidas siempre que el título esté vigente (...)". En este momento, hay 50 mil concesiones "caducadas" en el país, principalmente de ejidos, comunidades y pueblos, que no se imaginaban que sus derechos al agua tendrían que renovarse.

5. Los decretos no mencionan el derecho humano al agua, lo cual, desde la reforma al artículo 4o el 8 febrero 2012, tendría que estar en el centro de cualquier política hídrica. Asignan volúmenes para el "uso

público urbano", como si dicho uso fuera equivalente al derecho humano al agua. Sin embargo, el "uso público urbano" incluye cualquier uso al cual un organismo estatal o municipal quisiera concesionar o contratar sus aguas.

6. Destinan las grandes asignaciones para "uso público urbano" a los gobiernos estatales, con vigencia a 50 años; cada decreto especifica los estados que deben solicitar estos volúmenes, sentando las bases para la privatización vía trasvases, y el concesionamiento de servicios de agua y saneamiento (Agua para Todos, 2018).

Con la participación de la organización ambientalista internacional como la World Wildlife Fund (WWF), la Conagua pretendía promover una legitimación al contenido de los decretos; sobre todo al enfatizar el argumento de la reserva para uso medioambiental, lo cual se plantea como una demanda hecha por ellos y por varias organizaciones medioambientales mexicanas: "Las reservas de agua son un instrumento diseñado para proteger el caudal ecológico de las cuencas y asegurar los beneficios que los ecosistemas nos ofrecen a todos. Las reservas de agua no representan de ninguna manera la privatización del recurso, ni la extinción de ningún derecho al uso del agua vigente. Por el contrario, establecen claramente volúmenes de agua que deberán quedar intactos para la biodiversidad, lo que redundará en beneficio de todos, empezando por las comunidades rurales e indígenas" (WWF, 2018).

La Conagua también se ve en la necesidad de emitir un comunicado y defender su posición: "Los diez Decretos de Reserva de Agua, publicados el pasado 6 de junio en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2018) de ninguna forma otorgan beneficios para ningún particular, por el contrario, permitirán preservar el medio ambiente y garantizar el agua para el consumo humano de 18 millones de habitantes que aún no nacen, en una proyección a 50 años (...). En conclusión, las reservas de agua decretadas buscan que el agua disponible en las cuencas se guarde para las futuras generaciones y para el cuidado del medio ambiente, claramente se expresa en las mismas el destino medio ambiental y de uso público urbano, por lo que cualquier interpretación contraria solo busca desorientar y mal informar

a la población” (Decretos de reserva de agua no la privatizan, aclara Conagua tras bulo en medios, 18 de junio de 2018; DOF, 2018).

En efecto, la reserva para uso medioambiental es una deuda con las cuencas que antes no existía y que los mismos actores que han promovido un proyecto político democrático-participativo han demandado. Sin embargo, en los decretos, la reserva no está calculada en porcentaje (de acuerdo con las recomendaciones de la WWF), sino en metros cúbicos fijos. La disponibilidad de agua es variable y pueden llegar a quedarse “cortos” con el equilibrio medioambiental necesario.

La reserva para uso público-urbano proyectando el crecimiento de las ciudades también es positivo, pues levantar las vedas va a originar que los organismos operadores (públicos y privados) adquieran los nuevos aprovechamientos; no obstante, almacenarla y transportarla implicará obras con inversiones público-privadas que después pudieran comprometer otorgar el servicio de distribución a través empresas concesionarias.

El levantamiento de vedas significa que la Conagua puede dar nuevos derechos y concesiones a quien primero las solicite. Se comprende que la superficie de la cuenca en calidad de reserva abarca sólo una parte proporcional del total de la misma; el resto de la superficie puede otorgarse mediante solicitud a la Conagua, dando posibilidad de acceso a los usos productivos. En este caso, es previsible que los primeros en solicitar los derechos pueden ser las empresas de uso intensivo del recurso.

En definitiva, no se estaba pensando en una política pública integral. Sobre todo, no se había hecho manifiesto el papel de los consejos de cuenca (mecanismos participativos) como mecanismo de control y supervisión para evitar los comportamientos oportunistas antes descritos (Ostrom, 2000).

## Conclusión

Desde el poder del legislativo y ejecutivo federal (2012-2018) se estuvo impulsando una serie de reformas constitucionales y normativas, con el fin de reorientar el significado del agua como bien público. Se trataba de un discurso que colocaba la gestión del agua con una múltiple orientación: atender el derecho humano del agua, la capacidad ambiental y favorecer el crecimiento económico. La iniciativa de la LAN y los Decretos de Reservas de Agua (2018) fueron expresiones visibles de tales acciones.

Estas gestiones, vistas desde un contexto más amplio (reformas estructurales, entre ellas la energética y minera) y desde la lupa de las categorías de proyectos políticos y del ambientalismo del mercado, permiten identificar otros rasgos importantes de explicitar en el debate nacional.

En primer lugar, permite identificar la existencia de dos tipos de proyectos políticos. El primero, denominado en este artículo como desde arriba, está comandado por las premisas de racionalidad económica neoliberal. Pretende fundamentar su legalidad a partir del ejercicio realizado por los representantes del poder ejecutivo y legislativo (el uso de una democracia representativa). En este tipo de discurso hay un doble lenguaje: pretende justificar que se están atendiendo las necesidades del derecho humano y los niveles ecológicos de los ciclos del agua; sin embargo, en el eje central del discurso (contexto) se logra identificar un intento por resignificar el agua como bien público (y factor más de la producción y acumulación), a partir de su fuerte vinculación con el impulso de un crecimiento económico desde diferentes procesos: privatización, comercialización y mercantilización. El análisis de las características de la iniciativa de reforma a la LAN y la firma de los Decretos de Reserva, desde los marcos de referencia propuestos, permiten vislumbrar que la modalidad dominante se orienta en particular a un proceso de empujar el agua al ambientalismo de mercado.

En segundo término, se identifica la emergencia de otro tipo de proyecto político altamente heterogéneo: el desde abajo, proyecto ciudadano, democrático-participativo o iniciativa ciudadana. Desde este proyecto político no se excluye la importancia del agua como un insumo para el



desarrollo económico; sin embargo, se priorizan otros aspectos. Desde esta perspectiva, se pone especial atención a los criterios éticos de justicia-equidad-sustentabilidad. Una gestión basada en los principios de la racionalidad económica no es un mecanismo pertinente para solventar el criterio ético; al contrario, agudiza la desigualdad no sólo en la distribución del recurso (material) sino también de tipo económico.

El proyecto político dominante, el neoliberal, a pesar de ser heterogéneo, en sus expresiones tiene algunos componentes comunes: logra develar la intención de la normativa mexicana para subordinar la gestión pública del agua (como interés público) a la lógica de los requerimientos de los megaproyectos: rechaza el uso de fondos públicos, la transferencia de rentas y de costos ambientales, así como del bien público (agua) como insumo para la acumulación en favor de un pequeño grupo de la iniciativa privada. De esta forma, desde el proyecto alternativo, el democrático participativo, hay una respuesta al ambientalismo de mercado en su eje agua en los componentes que la construyen (privatización, comercialización y mercantilización del agua), a través de una concepción que pone en el centro el agua para la vida (agua para el consumo humano y ambiental) y hace énfasis en los instrumentos participativos, deliberativos y de rendición de cuentas para procurarlo.

La valoración positiva por varios de los actores implicados en la gestión del agua en México por un proyecto democrático participativo es por su potencial inminentemente instrumental en lo político: la posibilidad de ejercer derechos políticos y civiles para alcanzar derechos sociales (agua como derecho humano y un medioambiente sano), y materializar mecanismos de decisión en la asignación, donde participen todos los usos, así como de transparencia y rendición de cuentas en el nivel de cuenca, para asegurar que esas asignaciones siempre garanticen el bienestar social y ambiental de la cuenca.

Se recapitulan, por último, tres momentos del papel del gobierno federal mexicano frente a una nueva gestión del agua para resaltar la relevancia del agua con fines económicos y la prioridad de garantizar el acceso a los nuevos proyectos nacionales etiquetados de interés general. Dichos momentos son los siguientes: a) promulgación de la reforma energética en diciembre de 2013; b) propuesta de reforma

denominada Nueva LGA 2015, y c) decretos de reserva de agua de junio de 2018 (DOF, 2018).

Estas propuestas de reformas constitucionales y de normatividad (iniciativa de ley y decretos) se han expresado a partir del citado proyecto político neoliberal.

Con los decretos se resaltan algunos de los componentes relevantes; entre ellos los siguientes, vinculados con las reformas en materia energética y minera: mantiene la posibilidad del acceso al agua para los sectores económicos estratégicos, matizado desde la prioridad ambiental y de agua para consumo humano. No plantean centralmente la mercantilización del agua, pero la deja abierta a la privatización mediante el sistema de concesiones para aquellos que lo soliciten en primera instancia, una vez cubiertos los montos hídricos ambientales, sociales y energéticas. Este esquema de gestión implica una desvalorización económica del agua, pues a diferencia de la vía mercantilizadora en la LGA, los decretos retiran la categoría de veda, generando una percepción del agua como recurso ilimitado y posibilitando el acceso a fines económicos que así soliciten, cubriendo sólo el requisito institucional en trámite y a bajo costo para el sector productivo (\$3,894.00 pesos mexicanos para agua superficial o subterránea, según sea el caso).

## Referencias

- Aboites, A. L. (2009). *La decadencia de agua de la nación. Estudio sobre desigualdad social y cambio político en México*. México, DF, México: El Colegio de México.
- Agua para Todos. (2015). *Comparativa entre propuestas para una nueva Ley General de Aguas*. Recuperado de <http://aguaparatodos.org.mx/iniciativa-conagua-vs-iniciativa-ciudadana-ley-general-de-aguas>
- Agua para Todos. (2018). *Análisis inicial de los decretos de reservas del agua para uso público-urbano, ambiental y generación de energía eléctrica*. Recuperado de <http://aguaparatodos.org.mx/>
- Aguilar, L. F. (2006). *Gobernanza y gestión pública*. México, DF, México:

Fondo de Cultura Económica.

- Aguilera, F. (2008). *La nueva economía del agua*. Madrid, España: Catarata.
- Anderson, T., & Leal, D. (2001). *Free market environmentalism*. New York, USA: Palgrave.
- Arrojo, P. (2006). *El reto ético de la nueva cultura del Agua. Funciones, valores y derechos en juego*. Barcelona, España: Paidós.
- Bakker, K. (2005). Neoliberalizing nature? Market environmentalism in water supply in England and Wales. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(3), 542-565.
- Balanyá, B., Brennan, B., Hoedeman, B., Kishimoto, S., & Terhorst, P. (2005). *Por un modelo público de agua. Triunfos, luchas y sueños*. Barcelona, España: El Viejo Topo.
- Barreda, A. (2006). La privatización del agua y sus servicios en México. En: Barreda, A. (coord.). *En defensa del agua* (pp. 13-35). México, DF, México: Sindicato de Electricistas, Centro de Análisis Social, Información y Formación Popular (Casifop), Editorial Itaca.
- Caldera, A. (2015). Gobernanza y proyectos políticos: una revisión crítica desde la teoría normativa de la democracia. *Cuestiones Políticas*, 31(55), 14-29.
- Caldera, A. (2017). Cambio y confrontación de proyectos políticos en la gestión del agua en México. En: Pacheco-Vega, R. (coord.). *El agua en México: actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 215-248). México, DF, México: Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Caldera, A., & Torregrosa, M. L. (2010). Procesos políticos e ideas en torno a la naturaleza del agua: un debate en construcción en el orden internacional. En: Jiménez, B., Torregrosa, M. L., & Aboites, L. (eds.). *El agua en México: cauces y encauces* (pp. 317-346). México, DF, México: Academia Mexicana de Ciencias, Comisión Nacional del Agua.
- Castro, E., Torregrosa, M. L., Allen, A., Gómez, R., Vera, J., & Kloster, K. (2006). Desarrollo institucional y procesos políticos. En: *Perspectiva Transversal del IV Foro Mundial del Agua* (documento

- base núm. 2). México, DF, México: Comisión Nacional del Agua, World Water Council.
- Castro, J. E. (2012). Luchas sociales por el agua y el proceso de democratización en América Latina. En: Perevochtchikova, M. (coord.). *Cultura del agua en México. Conceptualización y vulnerabilidad social* (pp. 99.108). México, DF, México: Miguel Ángel Porrúa.
- Colby, B. (1988). Economics impacts of water law - State law and water market development in the southwest. *Natural Resources Journal*, 28(4), 721-749.
- Córdova, F. (2015). Y ahora van por el agua. *Portal Animal Político*. Recuperado el 3 de febrero de 2018: <https://www.animalpolitico.com/blogueros-blog-invitado/2015/03/09/y-ahora-van-por-el-agua/>
- Dagnino, E., Olvera, A., & Panfichi, A. (2006). *La disputa por la construcción democrática en América Latina*. México, DF, México: Centro de Investigación y Estudios Superiores en Antropología Social (Ciesas), Fondo de Cultura Económica.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (6 de junio de 2018). Decretos de reserva de agua no la privatizan, aclara Conagua tras bulo en medios. Recuperado de <https://www.etcetera.com.mx/nacional/decretos-reserva-agua-no-privatizan-conagua/>
- Donoso, G., Jouravlev, A., Peña, H., & Zegarra, E. (2004). *Mercados (de derechos) de agua: experiencias y propuestas en América del sur*. Serie Recursos Naturales e Infraestructura (núm. 80). Santiago de Chile, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Fortis, M., & Alhers, R. (1999). Naturaleza y extensión del mercado del agua en el D.R. 017 de la Comarca Lagunera, México. Serie Latinoamericana. *International Water Management Institute (IWMI)*, 10, 1-20.
- Gaceta Parlamentaria. (2015). *Exposición de Motivos de la propuesta ciudadana de Ley General de Aguas*. Palacio Legislativo de San Lázaro, jueves 5 de marzo de 2015. Recuperado de

<http://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/62/2015/mar/20150305-II.pdf>

- Hajer, M. (1995). *The politics of environmental discourse: Ecological modernization and the policy process*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Lee, T., & Jouravlev, A. (1998). *Los precios, la propiedad y los mercados en la asignación de agua. Serie Medio Ambiente y Desarrollo* (núm. 6). Santiago de Chile, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Leys, C. (2001). *Market-driven politics: neoliberal democracy and the public interest*. London, England: Verso.
- Ostrom, E. (2000). *El gobierno de los bienes comunes. La evolución de las instituciones de acción colectiva*. México, DF, México: Fondo de Cultura Económica.
- Santos, B. de S. (2004). La reinención solidaria y participativa del Estado. En: Santos, B. (coord.). *Reinventar la democracia. Reinventar el Estado*. Quito, Ecuador: Abya Yala, Friedrich-Ebert-Stiftung. Recuperado de: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/catalog/resGet.php?resId=48027>
- Sayago, S. (2014). El análisis del discurso como técnica de investigación cualitativa y cuantitativa en las ciencias sociales. *Cinta de Moebio*, (49), 1-10. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/cmoebio/n49/art01.pdf>
- Sen, A. (2001). *Bienestar, justicia y mercado*. Barcelona, España: Paidós.
- Simpson, L., & Ringskog, K. (1997). *Water markets in the Americas. The World Bank*. Washington, DC, USA: The International Bank for Reconstruction and Development.
- Toledo, V. (2016). *Ecocidio en México. La batalla final es por la vida*. Ciudad de México, México: Grijalbo.
- Urra, E., Muñoz, A., & Peña, J. (2013). El análisis del discurso como perspectiva metodológica para investigadores de salud. *Enfermería Universitaria*, 10(2), 50-57.



WWF, World Wildlife Fund. (2018). *Posición de WWF sobre los decretos de reservas de agua.* Recuperado de <http://www.wwf.org.mx/?uNewsID=329632>

## **La adopción social de tecnologías apropiadas en Chitejé de Garabato, Querétaro, México; un estudio exploratorio**

### **The social adoption of appropriate technologies in Chitejé de Garabato, Queretaro, Mexico; an exploratory study**

Daniel Murillo-Licea<sup>1</sup>

Roberto Romero-Pérez<sup>2</sup>

Eduardo López-Ramírez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Ciudad de México, México, [dmurillo@cieras.edu.mx](mailto:dmurillo@cieras.edu.mx), [danielmurillo2@yahoo.com.mx](mailto:danielmurillo2@yahoo.com.mx), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4923-6412>

<sup>2</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, [romero@tlaloc.imta.mx](mailto:romero@tlaloc.imta.mx)

<sup>3</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, [elopez@tlaloc.imta.mx](mailto:elopez@tlaloc.imta.mx)

Autor para correspondencia: Daniel Murillo, [dmurillo@cieras.edu.mx](mailto:dmurillo@cieras.edu.mx), [danielmurillo2@yahoo.com.mx](mailto:danielmurillo2@yahoo.com.mx)

#### **Resumen**

El artículo explora la definición de adopción social de tecnologías apropiadas de agua y saneamiento, los elementos que la componen y,

para conocer el funcionamiento de la tecnología y la organización social, se llevó a cabo una encuesta en el municipio de Amealco de Bonfil, Querétaro, en específico, en la localidad de Chitejé de Garabato, en el marco de la atención a localidades marginadas sin servicios de agua potable y saneamiento del Programa Agua Cerca de Todos, en el que se incluyó la construcción de tecnologías apropiadas. Se presentan los hallazgos de la encuesta y un análisis de los elementos que componen el concepto de adopción social de tecnologías apropiadas, contrastando algunas hipótesis preliminares con los resultados del ejercicio metodológico en la localidad mencionada.

**Palabras clave:** tecnologías apropiadas, agua y saneamiento, adopción social, transferencia de tecnologías, Querétaro.

### **Abstract**

The article presents the definition of social adoption of appropriate technologies of water and sanitation and the elements that compose it. A survey was carried out in the municipality of Amealco de Bonfil, Queretaro, specifically in the locality of Chitejé de Garabato, to know the operation of technology and social organization in the context of the attention to marginal localities without water and sanitation services of the Program Agua Cerca de Todos, which included the construction of appropriate technologies. We present the findings of the survey and an analysis of the elements that make up the concept of social adoption of appropriate technologies, contrasting some preliminary hypotheses with the results of the methodological exercise in the aforementioned locality.

**Keywords:** Appropriate technologies, water and sanitation, social adoption, technology transfer, Queretaro.

Recibido: 09/05/2017

Aceptado: 11/07/2018



## Introducción

En México sigue siendo un problema el acceso a los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento. En materia de agua, según los datos de INEGI (2010), aún hay 9.5 millones de personas sin acceso a tal servicio. Si a dicha población, la que carece totalmente de infraestructura hidráulica, se suman los hogares que no disponen de agua dentro de su vivienda (tienen el servicio en la localidad, pero fuera del terreno de la morada), la cifra aumenta a 25 millones de personas. Para contar con el vital líquido, estas personas deben obtener o acarrear el agua de alguna forma y muchas veces desde grandes distancias.

En relación con el servicio de alcantarillado o drenaje, hoy día permanecen 10.7 millones de personas sin acceso al servicio. De nuevo, el acceso es diferenciado en el ámbito urbano y rural; en las localidades urbanas, se tiene una cobertura de 96.5%, mientras que en las rurales es de 70.1% (INEGI, 2010). Por otro lado, existe un deficiente servicio de saneamiento de aguas residuales, que afecta la mayoría de las localidades del país.

Es importante señalar que este panorama se agrava en las comunidades rurales, pues ahí es mayor el rezago: mientras que en promedio, en las poblaciones urbanas 95.5% de la población cuenta con servicio de agua, en las poblaciones rurales dicho porcentaje baja a 80.3% (INEGI, 2010). Las razones que explican este retraso son de diversa índole: geográficas, pues se encuentran en zonas de difícil acceso; sociales, por las condiciones de irregularidad y precariedad en la que viven; económicas, al no ser incluidas en las redes centralizadas de agua entubada y saneamiento debido a las dificultades técnicas y financieras que representan para los organismos operadores integrarlos a dichas redes.

Para salvar este obstáculo y aspirar a lograr una cobertura plena de los servicios de agua potable y saneamiento en estas comunidades, se han impulsado estrategias de implementación de los programas sociales,

donde se espera que las comunidades participen en todas las etapas de los proyectos, además de privilegiarse el uso de tecnologías alternativas o apropiadas. El éxito de este tipo de iniciativas, además del bajo costo y la facilidad en la operación de las tecnologías, ha sido el involucramiento de las propias comunidades en el proceso de diseño, construcción, operación y mantenimiento de las tecnologías. Existen organizaciones de la sociedad civil que están trabajando en comunidades rurales marginadas y que tienen entre sus objetivos contribuir al desarrollo comunitario desde un enfoque de sustentabilidad ambiental, por lo que están implementado proyectos de ecotecnias o tecnologías alternativas, como cosecha de lluvia, baños secos, humedales artificiales, etcétera.

## Planteamiento teórico-metodológico

La idea subyacente en este texto, y su principal objetivo, es comenzar a tener pistas para analizar el nivel o grado de *adopción social* que han alcanzado los beneficiarios de localidades rurales en las cuales se han construido obras de agua y saneamiento a través de tecnologías apropiadas. ¿Por qué es importante el nivel de adopción social alcanzado por los programas o por las obras que se construyen con ellos? Porque si bien esos programas y sus respectivos sistemas de agua y saneamiento están orientados a resolver problemas básicos de las viviendas rurales, existen muchos factores de diversa índole que inhiben el buen funcionamiento. Si bien no existe una sistematización acuciosa ni un documento relativo a la cantidad de tecnologías que —como producto de los diferentes programas institucionales— siguen funcionando de modo adecuado después de ser construidas en las localidades, la evidencia empírica señala que un alto porcentaje de ellas no son usadas, se emplean de forma inadecuada o no siguen en funcionamiento. Hay, por cierto, ejercicios de revisión de enfoques y

tecnologías en México, pero presentan un panorama general sobre las tecnologías apropiadas (Ortiz-Moreno, Masera-Cerutti, & Fuentes-Gutiérrez, 2014) y se basan en cuatro rubros sustanciales: desarrollo, validación, difusión y monitoreo de las llamadas ecotecnologías (que son, también, tecnologías apropiadas), y no se hace énfasis en la adopción social. La adopción social está emparentada con la sustentabilidad de las obras construidas.

En un proyecto reciente llevado a cabo por el Instituto Mexicano de tecnología del Agua (IMTA) en 2013, relativo a la verificación de la sostenibilidad de las obras construidas por el Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales (Prossapys), desarrollado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), se concluye, entre otras cosas, que “La mayor debilidad de las obras estriba en la operación y mantenimiento de las mismas” (López-Ramírez & Moya-Fonseca, 2013: 189), y los autores agregan: “Para evitar que las obras que se encuentran en estado deficiente se deterioren es necesario reparar o rehabilitar las obras en esta condición de manera urgente. De lo contrario toda la inversión económica, la capacidad organizativa y el esfuerzo humano puesto en ello no servirá de nada” (López-Ramírez & Moya-Fonseca, 2013: 189-190).

Además del ya mencionado Prossapys, existen varios programas institucionales que han construido sistemas de agua y saneamiento, como el Programa de Infraestructura Indígena (PII), antes Programa de Infraestructura Básica para la Atención de los Pueblos Indígenas (PIBAI) de la Comisión para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI); el Programa Hábitat de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu), y el Programa de Desarrollo de Zonas Prioritarias (PDZP) de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). Todos estos programas no siempre realizan construcciones de sistemas centralizados o de tipo convencional, y en ellos se incluyen ciertas tecnologías apropiadas, por separado o en conjunto, para crear sistemas tecnológicos más complejos. Se le llama tecnología apropiada, alternativa o ecotecnia a la que cumple, por lo general, con los siguientes requisitos:

- a) Requiere poca inversión.

- b) Utiliza materiales disponibles en las comunidades o poblaciones.
- c) Necesita de un intenso trabajo de mano de obra.
- d) Es de escala reducida.
- e) Puede ser asimilada y mantenida por el grupo social que la utiliza.
- f) Es flexible y adaptable a modificaciones (Murphy, McBean, & Farahbakhsh, 2009).
- g) Se usa sin dañar el ambiente (Pérez & Zabala, s/f).

Algunos autores han incorporado, además de estos elementos, la cuestión de la tradición en el manejo del agua local (Ryan & Vivekananda, 1993) y la incorporación de lazos de parentesco para la apropiación tecnológica (Warriner & Moul, 1992). Otros autores han hecho énfasis en los aspectos del conocimiento local y cultural (Grieve, 2004; Driesen & Popp, 2010; Lawal, 2010), y en la relación entre las dimensiones sociales y la sustentabilidad tecnológica (Alam, 2013). Un concepto que aborda el asunto de manera distinta es el de tecnologías sociales (Thomas, 2011), en donde se incorpora la creación de capacidades y una interrelación mayor entre los sistemas sociales, cognitivos y tecnológicos. Sin embargo, muchos de estos trabajos enfatizan la aceptación de las tecnologías y no propiamente lo que se llama adopción tecnológica. Ciertamente es que las tecnologías alternativas pueden cumplir con estos requisitos, pero su uso, mantenimiento y funcionamiento también depende de las *formas utilizadas y los enfoques metodológicos* que fueron utilizados para la introducción de tales tecnologías. Es recomendable que el esquema tecnológico de introducción de este tipo de sistemas en localidades rurales reconozca al menos estos elementos: la importancia de los conocimientos de los destinatarios, su participación activa y la sustentabilidad ambiental (Pérez & Zabala, s/f), aunque se pueden agregar: la sustentabilidad social de la tecnología y la atención a una necesidad sentida por la propia población que será beneficiada. Es por ello que las "tecnologías apropiadas": "(...) presentan una serie de problemas: concebidas como intervenciones paliativas, destinadas a usuarios con escasos niveles educativos, acaban generando dinámicas *top-down* ('paternalistas'). Así, por un lado, privilegian el empleo de conocimiento experto, ajeno a los usuarios beneficiarios, y por otro sub-utilizan el conocimiento tecnológico local (tácito y codificado) históricamente acumulado" (Thomas, 2011: 9).

Al menos se pueden reconocer tres tipos generales de enfoques (teóricos y metodológicos) de introducción tecnológica en localidades rurales: transferencia tecnológica, apropiación y adopción social. Los dos primeros son manejados por lo común por instituciones públicas y organismos de desarrollo, por Organizaciones de la Sociedad Civil y por fundaciones nacionales e internacionales que apoyan la introducción de tales sistemas, sobre todo para subsanar las necesidades de agua y saneamiento. Pero el último enfoque es uno novedoso, al menos por su diferenciación con los otros dos anteriores (Martínez-Ruiz, Murillo-Licea, Starkl, López, & Libeyre; Murillo-Licea & Martínez, 2010), lo cual no impide que haya tenido acercamientos importantes y se hayan desarrollado experiencias hechas por grupos de la sociedad civil que bien podrían ser clasificadas dentro de este enfoque.

La diferenciación entre los tres enfoques mencionados está en la atención centrada sobre los distintos elementos que intervienen en la instrumentación, diseño e introducción de las tecnologías apropiadas. El primero que se identifica es el de *transferencia tecnológica*, centrado más sobre la relación entre el tecnólogo y su tecnología, y desde la visión de que desde la mirada de "laboratorio" se puede ajustar una tecnología a las condiciones reales de las localidades rurales. En estos casos, el propio "laboratorio" se puede extender a un lugar en donde se ofrecen y muestran las diversas tecnologías, casi siempre integradas en un solo sistema tecnológico. Por lo general, este tipo de enfoque se da en instituciones públicas que poco contacto tienen con las condiciones reales de vida y contextuales de los habitantes rurales, o tienen datos estadísticos que moldean tal tipo de acercamiento. Asimismo, también este tipo de introducción tecnológica se basa en sistemas homogéneos o en paquetes tecnológicos sin variaciones debido a la propia visión del que los ha desarrollado: eficiencia y funcionamiento desde la mirada laboratorista.

El segundo enfoque que se identifica está más orientado hacia la relación de la propia tecnología con los destinatarios directos, y es la que se denominará como *apropiación tecnológica*. Aunque se trata de un gran avance, porque se toma en cuenta a los destinatarios, el objetivo principal de este enfoque no es que funcione la tecnología y se construyan los sistemas tan sólo como en el enfoque de transferencia

tecnológica, sino que la tecnología sea utilizada por los beneficiarios. Sin embargo, el término “apropiación” presenta varios problemas, entre ellos que se trata de un verbo que impulsa a que alguien tome, para su uso personal o directo, un objeto. También existe el escollo de que el sistema tecnológico es un objeto externo a la localidad y por ello mismo surge la necesidad de apropiárselo para el uso cotidiano. Aunque hay varios acercamientos sobre la preponderancia de la participación social activa de los destinatarios, hay un elemento que no se toma en cuenta en este enfoque: la sustentabilidad social de las tecnologías. En la literatura sobre el tema parece que hay una sinonimia entre este enfoque y el de “aceptación de las tecnologías” o “asimilación” (De Luca, 2012; Viatte, 2001). Tampoco se enmarca esta sustentabilidad tecnológica en el campo lingüístico del desarrollo sustentable (Vega-Encabo, 2004), sino en una característica que permite la unión entre la dimensión social y la dimensión tecnológica.

Es por ello que se propone el término *adopción social de la tecnología* (Martínez-Ruiz *et al.*, 2010; Murillo-Licea & Martínez, 2010), enfoque en el que se toma en cuenta la relación del aparato tecnológico con los beneficiarios, pero en términos de sustentabilidad, es decir, de atender una necesidad específica y la durabilidad de esta relación en el tiempo. La adopción social según Martínez-Ruiz *et al.* (2010: 131) encuentra sus obstáculos cuando, desde la planeación institucional y la intervención ingenieril, no se toman en cuenta aspectos como el conocimiento del ambiente, las dimensiones higiénicas, sociales y económicas de la población objetivo, y sólo se hace énfasis en la organización y participación social. Murillo-Licea y Martínez (2010: 115) agregan la importancia de reconocer los conocimientos locales, la activa participación, y las sustentabilidades ambientales y sociales en relación con las tecnologías.

El enfoque de adopción tecnológica no se puede medir, por ello, en términos breves de tiempo, y tal vez ni siquiera a mediano plazo, sino a largo plazo. La adopción social de la tecnología se basa en una participación activa de la población objetivo durante todo el proceso, desde la elección de la tecnología hasta su mantenimiento y su replicabilidad. También, al otorgar la apertura a mecanismos propios de la zona, cultura, organización social local, o a los conocimientos y tradiciones de determinado lugar, el proceso tecnológico queda con las

huellas específicas de ciertas condiciones locales que facilitan su adopción. Carr (2016) ha mencionado el término de “integración” de una tecnología, refiriéndose a la aceptación; pero la adopción, como aquí se plantea, no sólo tiene que ver con la aceptación de un sistema tecnológico. Un concepto más emparentado con el que se propone sobre adopción tecnológica es el de “traslación tecnológica” (Vega-Encabo, 2004), que se refiere a un proceso de profunda transformación y de “reconsideración del diseño” de las tecnologías (Vega-Encabo, 2004: 58) y que se opone de modo diametral al enfoque de transferencia.

Un proceso imprescindible en la adopción social es el proceso de introducción de mejoras de la población en los sistemas tecnológicos: ello indica una selección y acercamiento a la tecnología, a la comprensión de su funcionamiento, y a la adecuación a condiciones y necesidades locales y específicas. En este sentido es que se halla el concepto de traslación muy apegado al de adopción, pero se suman las dimensiones de sustentabilidad y replicabilidad.

El enfoque de transferencia puede medirse a cortísimo plazo: se contabilizan las tecnologías construidas y el tiempo de uso pasa a plano final. En el proceso de apropiación, el término en tiempo es de corto y mediano plazos, una vez que los destinatarios saben cómo funciona y cómo se mantiene un sistema tecnológico. Pero en la adopción social de tecnologías, el plazo es largo y lo que cuenta no es sólo el proceso de construcción, o el de funcionamiento, el de capacitación o el de uso, o el de mantenimiento, mejoras incorporadas y replicabilidad de las tecnologías, u organización social para su uso y mantenimiento, sino que hace énfasis en la atención duradera a una necesidad. El término “adopción” difiere en gran medida del término “apropiación”, pues adoptar algo o a alguien es introducirlo a un círculo cotidiano, familiar, íntimo; el término apropiación lleva una connotación negativa de “tomar”; el de adopción infiere “acoger”.

La adopción social, entonces, incluye las acciones de participación social activa por parte de los beneficiarios; una capacitación y un acompañamiento que facilita los procesos de conocimiento y, en consecuencia, los de adopción social; dicha capacitación es un punto nodal para el buen funcionamiento de los sistemas tecnológicos y para lograr procesos de replicabilidad. En todo ello, el involucramiento de los destinatarios con el proceso tecnológico y con la propia tecnología es

fundamental: la interacción entre tecnología/usuario forma un proceso paralelo de sustentabilidad, cuya medición involucra una dimensión temporal. Se trata, precisamente, de la sustentabilidad tecnológica.

Por lo general, en los procesos de transferencia de tecnología hay una cadena de procesos (García-Vargas, 2014: 20) que, más o menos, se conforma de:

- a) Promoción de las tecnologías.
- b) Construcción de las tecnologías con mano de obra de los beneficiarios (participación en la construcción).
- c) Organización social (formación de comités para mantener los sistemas tecnológicos).
- d) Capacitación a los beneficiarios.
- e) Acompañamiento en el uso de tecnologías.
- f) Mantenimiento a los sistemas tecnológicos.

El paso g) no siempre se toma en cuenta, y es el de la evaluación de los sistemas tecnológicos, porque, como queda dicho, muchos programas y visiones chatas sobre los procesos tecnológicos reconocen que se atienden necesidades cuando se instala un sistema tecnológico; es decir, se confunde la tecnología en sí con la satisfacción de una necesidad.

Pero en los procesos de adopción social de la tecnología aparecen también estas etapas, incluyendo la de evaluación a diferentes escalas y con distintos periodos de tiempo (corto, mediano y largo plazos; p. ej., para obtener pistas sobre el proceso sustentable del uso de una tecnología o de un sistema tecnológico integrado). Pero una dimensión que aparece también, de forma transversal y no en serie, es el involucramiento; o el grado de involucramiento con la tecnología, es decir, la interacción. Como dicha dimensión es una más orientada hacia la subjetividad presenta cierta dificultad en su medición para el caso de una ponderación o de la creación de un índice de adopción social, por ejemplo.

El proceso de involucramiento entre las personas y los sistemas tecnológicos va más allá del uso, de los procesos y los periodos de mantenimiento, del tipo de información que se tiene para transmitirla a



nuevos usuarios; va más allá de las mejoras introducidas en los sistemas tecnológicos con base en la observación, la experiencia y el uso; va más allá de la capacidad de reproducir tales sistemas en otros lugares o en otras condiciones. El involucramiento también es una dimensión cognitiva y, sin exagerar, también guarda un componente afectivo y de atención no a la tecnología en sí, sino a la *relación* entre la tecnología y la *necesidad* específica que se atiende con ella.

En los procesos de introducción de tecnologías aparecen procesos muy similares: introducción, explicación de funcionamiento, capacitación, construcción, organización para el mantenimiento y uso. Pero no es en el proceso en donde está la clave para entender por qué los procesos de transferencia tecnológica no funcionan de manera adecuada y en donde procesos de adopción pueden ser más duraderos: se trata del enfoque con que se introduzca el sistema tecnológico, el contexto ambiental, social, cultural y económico (Murphy *et al.*, 2009). En el de adopción social se parte de la hipótesis de que entre mejor capacitación, mayor participación de la población y más involucramiento (interacción), habrá más sustentabilidad tecnológica.

En resumen: las dimensiones que se toman en cuenta en la adopción social son atención a una necesidad, sustentabilidad tecnológica, replicabilidad, participación activa, capacitación, interacción y organización social.

## **Contexto: el programa Agua Cerca de Todos**

Uno de los programas estatales para la atención de rezagos en cuanto a servicios de agua potable fue el programa Agua Cerca de Todos, diseñado y operado por la Comisión Estatal de Agua de Querétaro (CEAQ). El Programa Agua Cerca de Todos se derivó de un programa estatal más amplio, denominado "Soluciones", cuyo objetivo era "Mejorar integralmente la calidad de vida de las familias queretanas con mayores carencias, a través de apoyos diferenciados que atiendan sus necesidades" (Diario Oficial de Gobierno del Estado, 2010).

El objetivo del programa Agua Cerca de Todos era que la población queretana contara con acceso al servicio de agua potable, definiendo como meta principal que para el año 2015, la totalidad de habitantes de esa entidad federativa tuviera dicho servicio. Para lograrlo, la metodología seguida por el programa fue la realización de diagnósticos municipales, en donde uno de los componentes principales era la cobertura de servicios de agua potable, tomando en cuenta criterios como el número de población por municipio, demanda de agua potable, infraestructura hidráulica y fuentes de abastecimiento. Aunado a ello, se realizaron cuatro foros regionales de consulta y de participación ciudadana, incluyendo los 18 municipios del estado, para identificar de forma directa las localidades y los pobladores que carecían de este servicio (CEAQ, s/f). La CEAQ firmó convenios de colaboración con los 18 municipios del estado para incorporar la actuación municipal en la solución de este problema.

La población objetivo, definida a partir de la información extraída de los foros y de información estadística, fue de 145 mil pobladores, que se encontraban en zonas de difícil acceso y dispersas, y también población urbana que carecía de agua potable (CEAQ, s/f).

Según las reglas de operación del programa, los apoyos que se otorgan son enunciados de forma genérica como: "Sistema Integral de Abastecimiento de Agua Potable y/u Obras de Cabeza; ampliación y/o rehabilitación de redes de distribución de agua potable; instalación de hidrantes; instalación de fuentes protegidas (tinacos comunitarios, cisternas y abastecimiento de agua potable mediante vehículos cisterna-pipas); implementación de hidrotecnologías y ecotecnologías; esquemas de financiamiento para la contratación del servicio de agua potable de acuerdo con los convenios existentes; apoyos diversos (buenas prácticas en materia de agua y saneamiento, filtros, otros)" (CEAQ, 2013: 6).

Asimismo, en las reglas de operación se menciona que el Programa se ajustará a estándares internacionales en cinco rubros: calidad (la instancia reguladora diseñará un programa de seguridad del agua); cantidad, definida como volumen diario suministrado por persona; accesibilidad, definida como la distancia y el tiempo que toma a los beneficiarios tener acceso al agua; asequibilidad, definida como la tarifa definida en relación con usos, fuentes, diagnósticos socioeconómicos, ambientales, planes de inversión y otras herramientas que permitan

determinar las tarifas adecuadas a cada tipo de usuario; y continuidad, definida como el tiempo de que la población dispone de agua (CEAQ, 2013: 9-10).

Para lograr la cobertura total, el programa implementó estrategias de solución diferenciadas, que consistieron en la división de asentamientos formales, localidades mayores a dos viviendas y asentamientos no formales. En los asentamientos formales se tomó en cuenta la ampliación y rehabilitación de los sistemas ya construidos; muchas de estas obras beneficiaron a población urbana asentada en las inmediaciones de ciudades y que no contaba con el servicio. Para el caso de las localidades mayores a dos viviendas, se diseñaron sistemas formales o convencionales.

Para el caso más complicado, el de una o dos viviendas, por la dispersión y por el aislamiento, se propusieron ecotecnias o "hidrotecnologías", con base en un estudio de factibilidad socioambiental del funcionamiento de estas tecnologías, tomando en cuenta aspectos socioculturales, económicos y ambientales, y usando tecnologías como viviendas ecológicas, sistemas de captación de agua de lluvia y potabilización mediante filtros. El diagnóstico socioambiental fue realizado por la Universidad Autónoma de Querétaro en los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Landa de Matamoros y Pinal de Amoles (UAQ, s/f).

En el caso de asentamientos no formales (definidos como de forma irregular, carentes de servicios básicos y que obtienen estos servicios generalmente por autoconstrucción y cooperación comunitaria), se optó por construir hidrantes comunitarios; ante la necesidad de formalizar dichos asentamientos, se buscó formalizar la propiedad de los terrenos y, en algunos casos, hacer ampliaciones de las líneas de conducción y redes de distribución, así como instalar tinacos o hidrantes en viviendas, y construir tanques de almacenamiento ubicados en sitios estratégicos y de fácil acceso por los pobladores.

Como resultado de este componente del programa se instalaron 177 depósitos de almacenamiento de agua en 131 localidades; se adquirieron 30 camiones cisternas para la entrega de agua (UAQ, s/f; CEAQ, 2013).

Para la atención a localidades de una o dos viviendas se definieron 50 ecotecnias o hidrotecnologías a instalarse de forma estratégica en localidades de los municipios mencionados, tomando en cuenta la siguiente oferta tecnológica: cisternas de ferrocemento; tabique capuchino o tinacos de polietileno; sanitarios secos; sistemas de captación de agua de lluvia (que incluye cambios de techo de las viviendas en algunos casos); bombas sumergibles con celdas fotovoltaicas; filtración de agua de lluvia a través de malla; filtro modular de sedimentos, y filtros purificadores familiares. Estas tecnologías también fueron complementadas con acciones y obras de conservación de agua y suelo, sobre todo en áreas de captación o de manantiales, y labores de reforestación (UAQ, s/f).

Los fondos para este componente del Programa fueron concurrentes, y vinieron de fundaciones privadas (Fundación Gonzalo Río Arronte y Agencia de Desarrollo Sierra Gorda, A. C., actualmente llamada Fundación Latinoamericana para el Agua y la Vivienda Sustentable A. C.); de la CEAQ; de la Universidad Tecnológica de Querétaro, y de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las mayores aportaciones económicas las hicieron la Fundación Gonzalo Río Arronte (37.2%) y la CEAQ (34.2%). La inversión total en este programa fue de \$6 364 900.00 (CEAQ, s/f).

En cuanto al abastecimiento por sistemas formales, se actuó en 153 localidades queretanas, instalando infraestructura hidráulica, perforando nuevas fuentes de abastecimiento, construyendo tanques de almacenamiento y líneas de conducción, lo cual benefició a 4 079 habitantes.

Una actividad incorporada al programa fue la creación de una contraloría social, en donde se instó a la creación de comités que tuvieran como funciones la de vigilancia de construcción; resultados de visitas de inspección técnica; reporte de irregularidades; participación en procesos de entrega y recepción de las obras. El programa reporta haber constituido 143 comités de contraloría social en igual número de localidades. En las reglas de operación del Programa se enuncia que cada comité "estará integrado por un número paritario de beneficiarios hombres y mujeres que, de manera organizada, independiente, voluntaria y honorífica, se constituyan con tal carácter ante la instancia reguladora" (CEAQ, 2013: 8).

## **El caso de la localidad de Chitejé de Garabato, municipio de Amealco de Bonfil, Querétaro**

El municipio de Amealco de Bonfil se localiza en el extremo sur del estado de Querétaro, México. Colinda al norte con los municipios de Huimilpan y San Juan del Río; al este, con el municipio de San Juan del Río y el Estado de México; al sur, con los estados de México y Michoacán de Ocampo; al oeste, con el estado de Michoacán de Ocampo y con el municipio de Huimilpan (Gobierno del Estado de Querétaro, 2013).

El municipio tiene una superficie de 682.1 km, que equivale a 5.8% de la superficie total del estado. Cuenta con 159 localidades de las cuales dos son urbanas y 157 rurales. Una de ellas, donde se centrará la atención, es Chitejé de Garabato, ubicada a 19.6 km de la cabecera municipal, a dos kilómetros de los límites con el estado de Michoacán y a 2.7 km aproximadamente del río Lerma. Chitejé de Garabato tiene una extensión de 1 063 hectáreas (Guzmán, 2014). Su población es de 1 625 habitantes; 48.18% mujeres y 51.82% hombres. La estructura de población por grupos de edad arroja los siguientes resultados: 56.18% de la población está en edad productiva (entre los 15 y 59 años), mientras que los grupos de edad dependientes (de 0 a 3, de 3 a 15 años y de 60 y más años) representan 43.81% (INEGI, 2010). La población indígena de Chitejé de Garabato representa 42% de su población total, lo que equivale a 698 habitantes (CDI, 2010). De acuerdo con el Consejo Nacional de Población (Conapo, 2012). Chitejé de Garabato tiene un grado de marginación alto. Este indicador es uno de los criterios de elegibilidad de diversos programas sociales.

En el lapso de diez años, el porcentaje de viviendas con piso de tierra disminuyó 27%; el de viviendas con energía eléctrica pasó de 87 a 94%; el de hogares con agua dentro de la vivienda pasó de 59 a 82%, y el de drenaje se incrementó en 41 puntos porcentuales, como se ve en la Tabla 1. Estas cifras hacen evidente la necesidad de realizar acciones

orientadas a incrementar la cobertura de agua potable y drenaje en la localidad de estudio.

**Tabla 1.** Características de las viviendas en Chitejé de Garabato, Querétaro.  
Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

Año	Total de Viviendas	Piso de tierra (%)	Electricidad (%)	Agua DV (%)	Excusado (%)	Drenaje (%)
2000	305	35.73	86.55	58.68	50.16	24.59
2005	328	30.18	90.85	75.30	52.43	46.64
2010	343	9.07	93.58	82.21	66.76	66.18

Si se analiza el acceso al agua de acuerdo con las variables que ofrece el INEGI, se observa que para los años 2000 y 2005, sólo una quinta parte de las viviendas que contaba con agua de la red pública disponía de este servicio dentro de la vivienda; el resto disponía del servicio fuera de la vivienda, pero dentro del terreno (INEGI, 2000; INEGI, 2005). No obstante, estas cifras se invierten para año 2010, donde la mayor parte (82.21%) cuenta con servicio dentro de la vivienda y sólo 17.79% lo tiene fuera de la vivienda, pero dentro del terreno. Hasta el año 2005, las formas de abastecimiento cuando no se disponía de agua dentro de la vivienda eran, principalmente, a través de los manantiales cercanos a la comunidad.

Por su parte, del total de viviendas con drenaje en el año 2000, 64% estaba conectada a la red pública, 13% tenía fosa séptica, y 22.7% desaguaba sus aguas negras a barrancas o grietas. Para 2010, el porcentaje de viviendas con drenaje aumentó, sin embargo no se cuenta con datos desagregados sobre el tipo de desagüe.

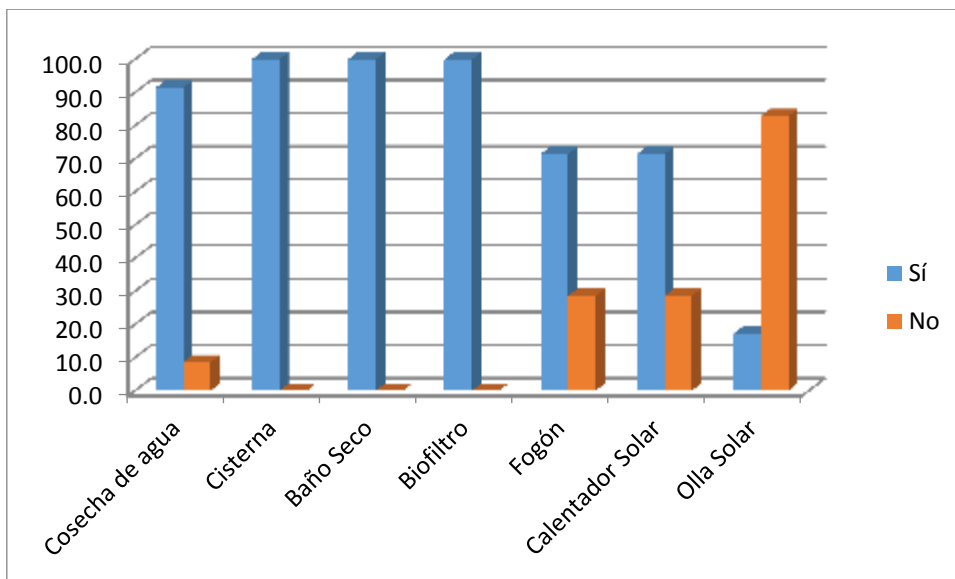
En estas condiciones, el Programa Agua Cerca de Todos intervino en Chitejé de Garabato (iniciado desde 2007) (Conagua, 2016), incorporando la construcción de sistemas de agua y saneamiento mediante tecnologías apropiadas. Así, la Fundación Latinoamericana para el Agua y la Vivienda Sustentable A. C. (FLAVSAC) desarrolló un proyecto para la construcción de paquetes tecnológicos que incluyó diversas ecotecnias, como sistemas de cosecha de agua de lluvia,

cisternas, baños secos, biofiltros, fogones, calentadores y ollas solares. Sin embargo, es importante mencionar que en esta localidad hubo varias intervenciones gubernamentales que plantearon y construyeron sistemas tecnológicos para atender necesidades de agua y saneamiento. Intervinieron ahí la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), en 2007; la Semarnat, Fundación Mariana Trinitaria, Gobierno del Estado, la Comisión para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI), la Secretaría de Desarrollo Social y el municipio de Amealco de Bonfil en 2008; el gobierno del estado, Semarnat y CDI en 2010, atendiendo en estos tres años a 70 familias (Conagua, 2016: 57). En tales condiciones, los pobladores no identifican de forma clara la intervención específica de cada una de las instituciones gubernamentales mencionadas, ni las tecnologías introducidas por cada una, ni tampoco la intervención directa de la Fundación Latinoamericana para el Agua y la Vivienda Sustentable A. C.

Precisamente para conocer el impacto y funcionamiento de dichas tecnologías y su posible grado de adopción social es que se hizo un estudio específico, tomando en cuenta que una evaluación *expost* del funcionamiento de las tecnologías apropiadas no suele realizarse y es por ello que se desconoce la situación de las tecnologías construidas en ámbitos rurales. Este estudio fue realizado por el IMTA en 2015, tomando como metodología de recolección de información una encuesta a 35 personas de Chitejé de Garabato (que corresponde con igual número de viviendas): 34 mujeres y un hombre. Se estima que la encuesta recogió las opiniones de la mitad de las familias atendidas en la totalidad de la intervención tecnológica por las instituciones ya mencionadas. Las edades de los encuestados van de los 15 a 78 años; la importancia de encuestar mujeres fue porque ellas son las que suelen utilizar la mayoría de las tecnologías. El promedio de habitantes por vivienda es de cinco habitantes, aunque existen viviendas que tienen hasta 10 habitantes y en otro extremo un solo habitante. La encuesta hizo énfasis en tres aspectos, considerados como sustanciales: participación en la construcción de las tecnologías; capacitación recibida para la operación y el mantenimiento; y funcionamiento de las tecnologías. Una hipótesis que resultó relevante para los fines del presente trabajo es que a mayor involucramiento de la localidad o mayor necesidad de ésta de resolver sus carencias, mayor tendría que ser el nivel de adopción social de las tecnologías.

## Tecnologías apropiadas en Chitejé de Garabato

En las viviendas de la población encuestada se encontró una distribución de ecotecnias construidas como la que se muestra en la Figura 1.

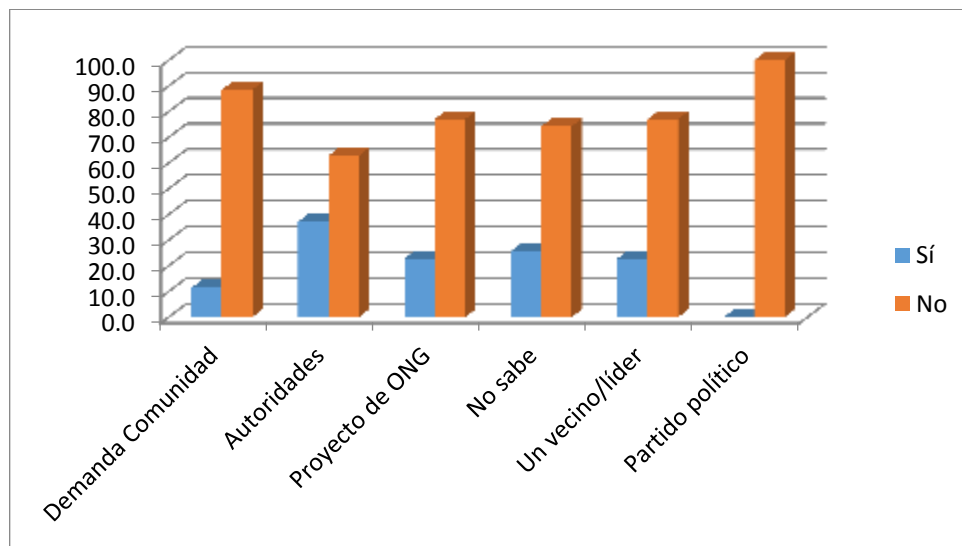


**Figura 1.** Ecotecnias construidas en la comunidad de Chitejé de Garabato, Querétaro (%).

Como se puede apreciar en la Figura 1, todas las personas encuestadas fueron beneficiadas con las tecnologías, aunque no todas requirieron o fueron beneficiarias de todas las tecnologías ofertadas por la FLAVSAC en su proyecto. En este sentido, existen diferentes apreciaciones de los beneficiarios respecto a cómo llegó el programa al localidad, y éstas se hayan divididas por quienes afirman que fue una solicitud de la comunidad, quienes dicen que las autoridades les otorgaron la obra, otros más que fue una Organización No Gubernamental la que implementó el programa y hasta un porcentaje mencionó que un líder o



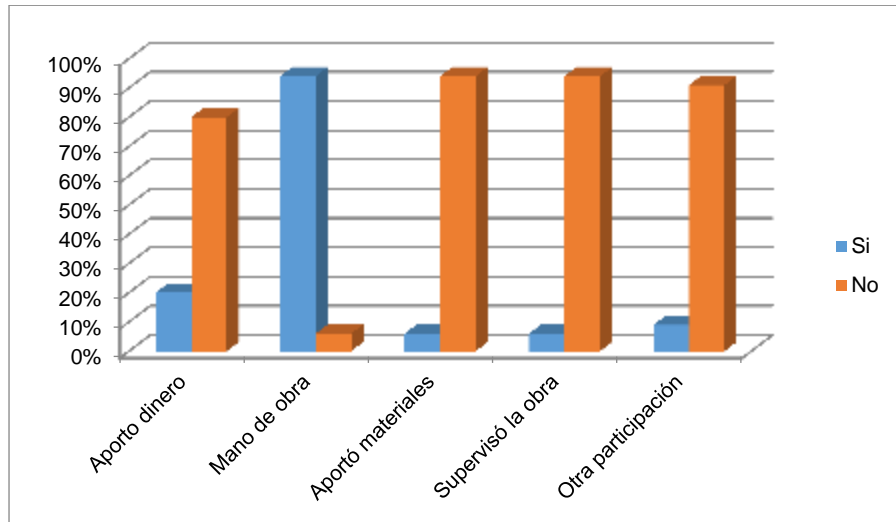
vecino. Esta situación es entendible debido a que el programa desarrollado por la FLAVSAC ya tiene algunos años se haberse implementado y la gente no tiene registro exacto de qué institución u organización construyó el programa, como se constata en la Figura 2.



**Figura 2.** ¿Cómo surgió la idea del proyecto? (%).

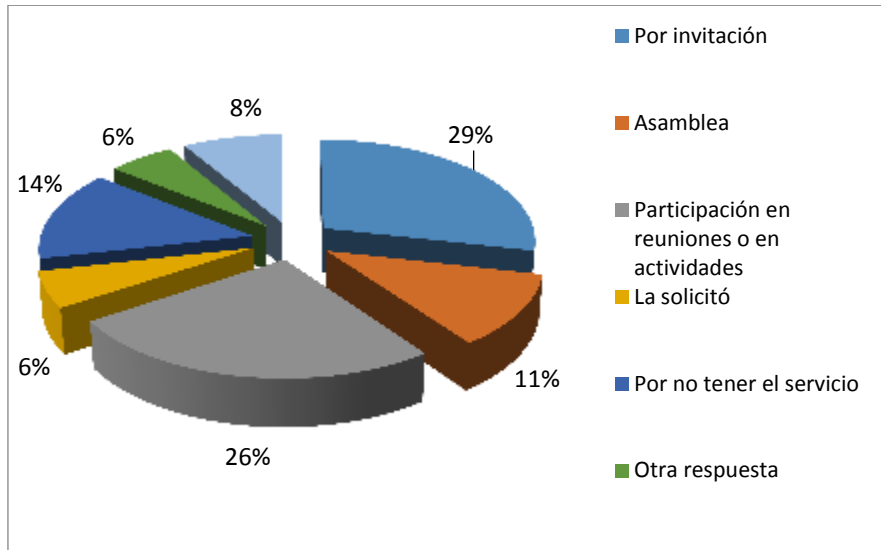
Como se puede observar en la Figura 2, existe un abanico de afirmaciones que la gente identifica como quién llevó el programa a la localidad, en las que, al parecer, no existe coincidencia; en lo que sí existe un acuerdo es en que el programa no fue implementado por ningún partido político.

Dado que el supuesto de la participación es importante, y para darle congruencia la forma en que el programa llegó a la comunidad, se consultó a los encuestados de qué manera participaron en el proyecto y los diferentes aportes que hicieron. En este sentido se obtuvo que de los 35 beneficiarios que participaron en las actividades del proyecto, el mayor aporte fue en mano de obra para la construcción, como se puede apreciar en la Figura 3.



**Figura 3.** ¿De qué manera participó en el proyecto? (%).

De las tecnologías construidas, 33 personas contestaron que se instalaron en todas las casas, y sólo dos de ellas respondieron que no sabían. Un aspecto relevante para los fines de este estudio se refiere a la forma en que fue seleccionada la vivienda para que en ella se construyeran tecnologías; al consultárseles sobre “¿cómo se seleccionaron sus viviendas para ser beneficiada?” Las respuestas variaron y se resumen en la Figura 4.



**Figura 4.** ¿Cómo seleccionaron su vivienda para ser beneficiada?

Como puede observarse en la Figura 4, la mayoría de las personas fue invitada (29%); otro porcentaje dice haber participado en reuniones (26%); otro más, en asambleas (11%); un porcentaje menor (14%) por no tener servicio. Si se suman todos estos porcentajes, da un 80% de personas que, al interpretar las respuestas, se considera que fueron invitadas, y que dicha invitación fue a quienes no tenían el servicio o necesitaban complementar los servicios de su viviendas; es evidente que dicha invitación se desarrolló en asambleas o en reuniones en las cuales tuvieron que participar. Pero ello no ayuda a definir cómo se implementaron las tecnologías.

Acorde con el punto anterior, tomando en cuenta que un 94% de los encuestados dijo haber participado con mano de obra en el proceso de construcción de tecnologías, se les hizo la pregunta de quién había construido las tecnologías. El 83% de los que respondieron se vio involucrado de modo directo en la construcción de tecnologías; un 9% obtuvo ayuda de un albañil, y 8% dejó la construcción en manos de un albañil. En resumen, la mayoría de las personas encuestadas participó de forma directa en la construcción de ecotecnias o tecnologías apropiadas.

Sobre los problemas que existieron en torno a la construcción de las obras, estos fueron más bien asociados con la insuficiencia de materiales o con aspectos no previstos en la construcción de las obras. En este sentido, se reporta que sólo uno de los encuestados mencionó haber tenido problemas relacionados con la construcción y este problema fue relativo a la falta de material.

Un aspecto relevante fue el que se refirió a la capacitación para la operación y mantenimiento de la obra: de los encuestados, 33 mencionaron haber tenido capacitación y sólo dos de ellos dijeron que no. En este sentido, a los 33 se le consultó sobre la calidad de la capacitación recibida. El resultado se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** La capacitación fue:

Capacitación	Frecuencia	Porcentaje (%)
Buena	28	80.0
Regular	5	14.3
Total	33	94.3
No recibieron capacitación	2	5.7
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>100.0</b>

Otro aspecto relevante que se exploró con la encuesta fue el relativo a la formación de una organización social para la construcción y el mantenimiento de las tecnologías; en este caso, la formación de un comité. Al respecto se preguntó si "Durante la ejecución del programa, ¿se formó algún comité u organización?", a lo que 97% de los encuestados contestó que sí. Al preguntárseles cuáles eran sus funciones, las respuestas fueron diversas, como aparece en la Tabla 3.

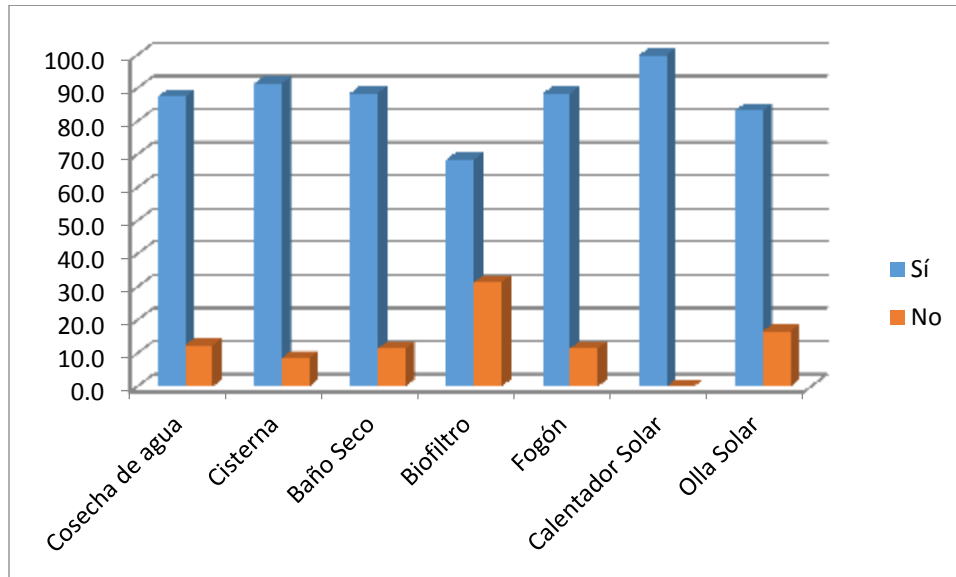
**Tabla 3.** Durante la ejecución del programa. ¿Se formó algún comité u organización? (%)

	¿Cuáles eran sus funciones?	Total

	Supervisar y organizar obras	Supervisar y organizar el material	Revisión y avance de la obra	Aviso de juntas de información	Capacitación y motivación	Otra	No opera	
Sí	17.1	40.0	17.1	5.7	14.3	2.9	0.0	97.1
No	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	2.9
<b>Total</b>	<b>17.1</b>	<b>40.0</b>	<b>17.1</b>	<b>5.7</b>	<b>14.3</b>	<b>2.9</b>	<b>2.9</b>	<b>100.0</b>

Como puede apreciarse en la Tabla 3, la mayoría de las funciones estaba centrada en la revisión y organización de los materiales, y en menor medida en supervisar las obras y el avance de las mismas. Sin embargo, aun cuando desde la perspectiva de los beneficiarios el comité tuvo su importancia, actualmente 65% de los encuestados menciona que el comité ya no funciona. El 14% dice que no sabe si opera o no, y sólo el 8% mencionó que continúa funcionando. También se les preguntó si, al concluir la construcción de las tecnologías, las instituciones que introdujeron las tecnologías se encargaron de verificar su funcionamiento: 88.1% respondió que sí; 11.4% contestó que no.

Resultado de los puntos anteriores, y un elemento de relevancia para este trabajo, era conocer si las tecnologías seguían en funcionamiento y las razones derivadas de ello. Las respuestas a la pregunta sobre el funcionamiento de las tecnologías apropiadas que fueron construidas en la localidad se pueden apreciar en la Figura 5.



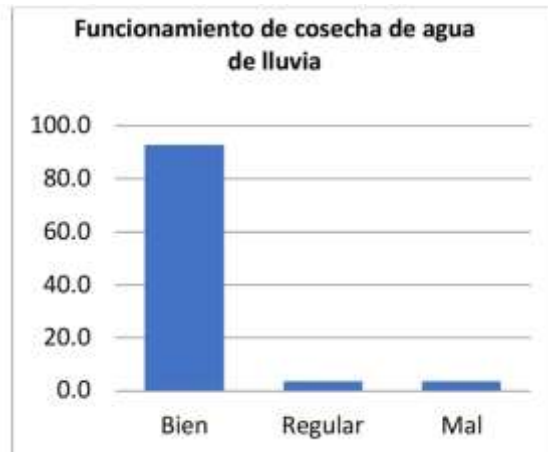
**Figura 5.** ¿Sigue en funcionamiento su tecnología? (%).

Como se puede observar en la Figura 5, 91% de las tecnologías construidas sigue funcionando y sólo 9% no está más en funcionamiento. De todas las tecnologías, la que indica un funcionamiento en todos los casos es el calentador solar. Las tecnologías apropiadas que más se emplean y siguen funcionando (en su mayoría) son la cisterna, en primer lugar; el baño seco, en el segundo; y los sistemas de captación de agua de lluvia, en tercer lugar. Las tecnologías que más se han dejado de utilizar han sido los biofiltros.

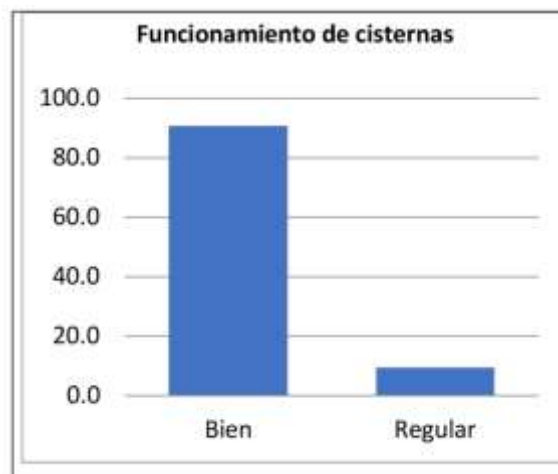
La cantidad y porcentaje de tecnologías que ya no funciona es muy pequeño. Al explorar las razones por las cuales han dejado de funcionar, en prácticamente todos los casos las causas tienen su origen en factores propios de decisiones familiares, como falta de interés en hacer reparaciones o darle mantenimiento; en haberle dado otro uso (como almacén, p. ej., en caso de los baños secos); en que lo dejaron de usar, o el uso se considera peligroso para los niños.

No obstante que la mayoría de tecnologías apropiadas en esta localidad ha seguido funcionando, se consideró pertinente indagar *cómo califican los usuarios su funcionamiento*; las ponderaciones en porcentajes

hechas para cada tecnología se pueden apreciar en la Figura 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9.



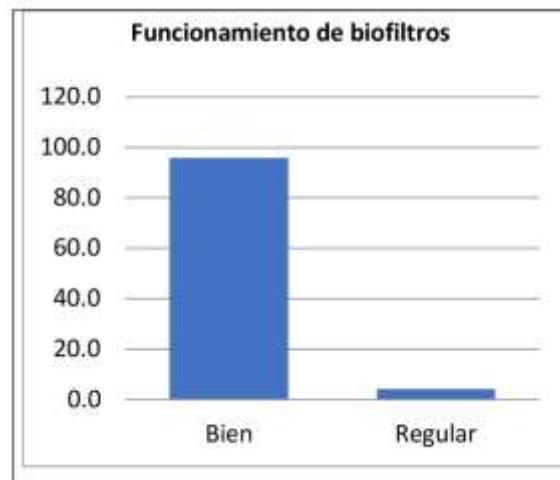
**Figura 6.** Cosecha de agua de lluvia.



**Figura 7.** Cisternas.



**Figura 8.** Baño seco.



**Figura 9.** Biofiltro.

Como se puede observar en las figuras anteriores, la ponderación que le da la mayoría de los usuarios a sus tecnologías en buena. Esto se debe a que estas obras siguen siendo de utilidad para los usuarios y, quienes así opinan, consideran que han sido de utilidad para las actividades cotidianas de su vivienda y de sus familias.



Un aspecto relevante que se indagó fue el relativo al mantenimiento de las obras (Tabla 4), pues como se sabe, es un aspecto imprescindible para el buen funcionamiento de las mismas, para que el instrumento tecnológico cumpla las funciones para las que fue construida y forma parte del grado de interacción con la tecnología.

**Tabla 4.** Le da mantenimiento a su... (%).

Respuesta	Cosecha de lluvia	Cisterna	Baño seco	Biofiltro
Sí	57.1	56.3	80.6	70.8
No	39.3	40.6	12.9	25.0
No contestó	3.6	3.1	6.5	4.2
<b>Total</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

Como se puede apreciar en la Tabla 4, del total de tecnologías construidas, entre un 45 y 50% de los usuarios entrevistados afirmó darle mantenimiento a sus tecnologías; de acuerdo con los resultados de esta encuesta, dicho mantenimiento consiste en las actividades propias que requieren dichas obras, como limpieza de canales y techos, en el caso de los sistemas de captación; vaciado y limpieza de cámara, en el caso de baños secos, etcétera.

En paralelo con las preguntas relativas al mantenimiento, se preguntó si los usuarios habían realizado alguna modificación a las tecnologías; en promedio, el porcentaje de modificaciones fue de entre 2 y 3%, por cual se considera que no es relevante para fines del estudio.

Otro aspecto que se indagó es el relativo a las mejoras que los usuarios perciben sobre su vivienda, producto de la construcción y uso de las tecnologías. Con excepción de los baños secos, en donde la mayoría de los encuestados reconoció que esta tecnología ha mejorado su vivienda; las opiniones sobre las cisternas y biofiltros se encuentran divididas, como se puede constatar en la Tabla 5. La explicación a esta percepción es que los beneficios de tener un baño seco son más *visibles* y requieren una *interactividad* mayor entre la tecnología y los usuarios que lo que puede propiciar una cisterna o un biofiltro.

**Tabla 5.** ¿La tecnología ha contribuido a mejorar su vivienda? (%).

Respuesta	Cisterna	Baño seco	Biofiltro	Otra tecnología
No	46.9	28.6	58.3	12.5
Sí	53.1	71.4	41.7	87.5
<b>Total</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

## Discusión: la adopción social de las tecnologías construidas en Chitejé de Garabato

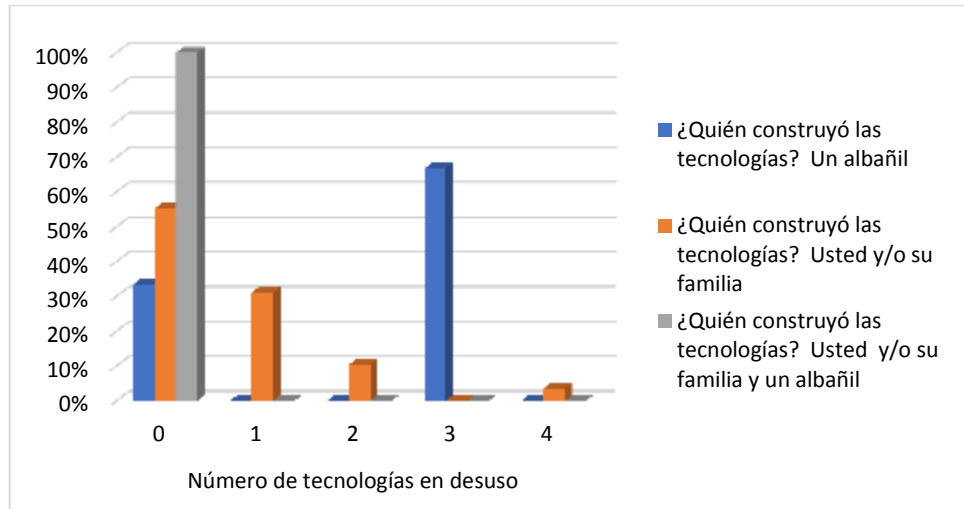
Las ideas subyacentes en la adopción social se refieren a que mientras más capacitación mayor participación y más involucramiento (interacción) tengan los beneficiarios (o futuros usuarios) de las tecnologías en las acciones del programa, funcionamiento, operación y mantenimiento de éstas será más eficiente y, en consecuencia, mejor usadas. En dicho sentido, se exploraron algunas relaciones básicas de las respuestas obtenidas en la encuesta, que pueden arrojar algún indicio sobre tales supuestos. Para tal fin, se decidió abordar dos momentos diferentes: la construcción y el uso de las tecnologías, en el entendido que en ellos está implícita la participación de los usuarios. Para tal efecto y para el análisis, se tomaron en cuenta las siguientes dimensiones de adopción social: interacción en la construcción, capacitación, interacción con el funcionamiento, organización social y replicabilidad. Las dimensiones que se obvian, por los resultados ya anotados, y que aparecen como constantes son atención a una necesidad, sustentabilidad y participación activa.

### **a) Aportes hechos por el usuario para la construcción de la obra**

Como se pudo observar en los resultados directos de la encuesta aplicada a pobladores de Chitejé de Garabato, 94% de los usuarios aportó mano de obra para la construcción de tecnologías. Correlacionando los datos específicos por cada tecnología construida, si ésta funciona o no, y si los pobladores la construyeron directamente, pareciera existir una relación evidente entre el aporte de mano de obra de los usuarios y el funcionamiento de la obra.

De acuerdo con los resultados de la encuesta, los usuarios no aportaron dinero, materiales o supervisión de manera significativa; en los casos que consideraron que hicieron este tipo de aportes, los porcentajes son muy pequeños. Por tal razón, se infiere que existe una relación directa entre la participación con trabajo (mano de obra) de los beneficiarios y el funcionamiento de la obra. Esta hipótesis sugeriría o reforzaría la idea de que, a mayor involucramiento directo de los beneficiarios en la obra en su construcción mayor es el funcionamiento que las obras tendrán (y es una de las condiciones de la adopción social, como se ha definido en apartados anteriores), pues tal participación supone que el usuario conoce el costo personal de haber construido la obra y, en consecuencia, *valora más la utilidad* de la misma.

Haciendo un cruce entre el número de tecnologías en desuso y el tipo de constructor de las tecnologías (Figura 10), se encuentra que cuando las tecnologías las construyó un albañil, el número de tecnologías en desuso es más grande que cuando participaron y fueron construidas por las familias que las utilizan. La Figura 10 muestra cinco grupos de barras, que corresponden al número de tecnologías en desuso. El primer grupo de barras indica que todas las tecnologías se encuentran en uso constante.



**Figura 10.** Número de tecnologías en uso/desuso y quién las construyó (%).

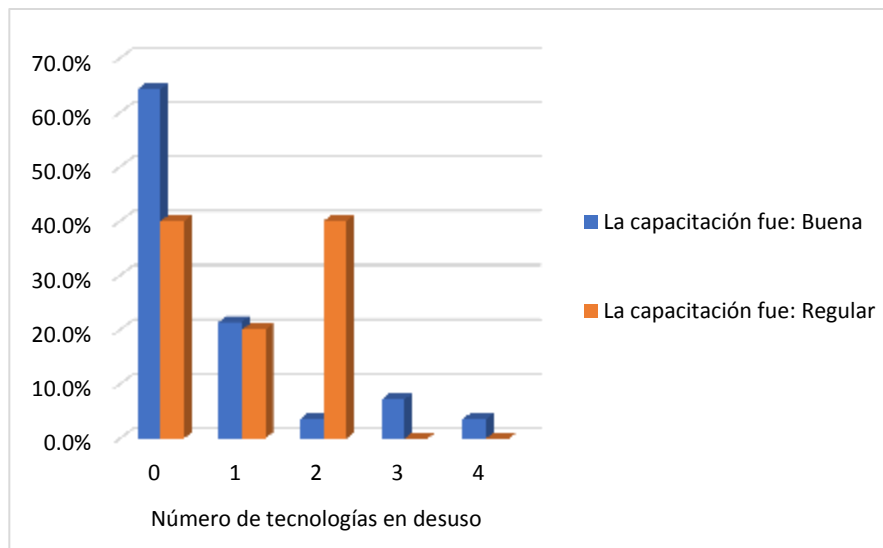
En consecuencia, es posible afirmar, dada la tendencia en la autoconstrucción, que la utilización y utilidad de la mano de obra en este tipo de proceso genera un mejor funcionamiento de la tecnología o un funcionamiento más duradero; es decir, que la interacción con la tecnología en la construcción genera mayor sustentabilidad de la misma.

## **b) Capacitación de los usuarios y funcionamiento de la obra**

Otro supuesto importante de la adopción social es el relativo a que mientras exista o se proporcione mejor capacitación a los usuarios de las tecnologías, éstas tendrán un mejor funcionamiento. Al igual que en el punto anterior, lo que indican los datos de la encuesta es que la capacitación tiene una incidencia favorable en el funcionamiento de la tecnología. Haciendo una correlación entre capacitación y el actual funcionamiento de las tecnologías, en prácticamente todos los casos, las tecnologías que siguen en uso están asociadas con la capacitación

recibida. No obstante, también se puede observar que existen factores de índole personal o familiar que han incidido para que, en algunas familias, las personas dejen de utilizarlas o no les den un uso adecuado.

Haciendo un cruce de información con los datos de la encuesta, como se observa en la Figura 11, se puede observar que si se ha recibido una mejor capacitación en el uso de las tecnologías, hay más probabilidad de que no haya tecnologías en desuso. Es decir, no basta con que en el proceso haya capacitación (y, como en el caso de Chitejé de Garabato haya sido para casi todos los pobladores involucrados), sino que la *calidad* de la capacitación es la que cuenta.



**Figura 11.** Número de tecnologías en uso/desuso y calificación en la capacitación (%).

### c) Interacción de usuarios con la tecnología

Hay dos tipos de interacción con las tecnologías: el primero es el mantenimiento; el segundo, la modificación o adaptación que los

pobladores hayan hecho sobre las tecnologías, como un paso más de la adopción social.

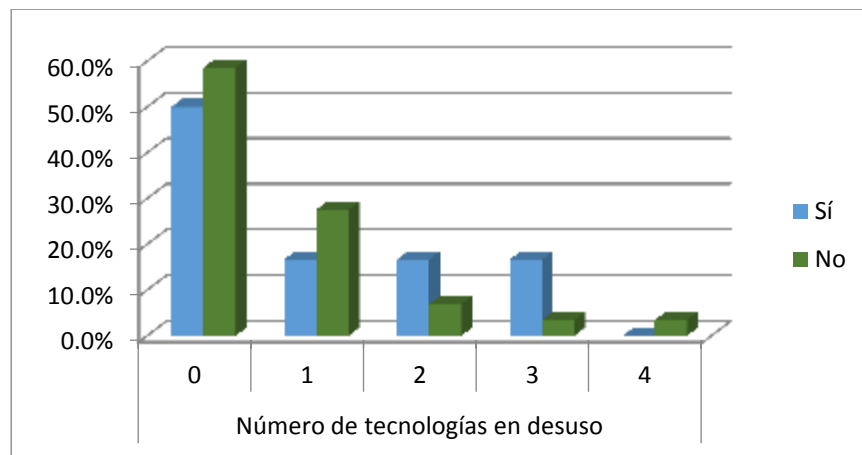
Primer caso: relación mantenimiento y funcionamiento de las tecnologías. Cuando se correlacionan los datos y se verifica el mantenimiento que los usuarios le dan a la tecnología *versus* el funcionamiento, los números muestran ligeras variaciones, pues como se puede mostrar en la Tabla 6, alrededor de 60% de los usuarios le da mantenimiento a sus tecnologías; mientras que el resto de ellos (alrededor de 40%) no le dan el mantenimiento necesario; es decir, incluso cuando las tecnologías siguen funcionando, el porcentaje de las personas que le da mantenimiento es reducido. Esta situación, como se citaba en el principio de este documento, conlleva el riesgo de que, de continuar esta tendencia, en un corto tiempo la capacidad de funcionamiento de las tecnologías se vea muy afectada.

**Tabla 6.** Cruce de información obtenida entre mantenimiento y funcionamiento actual de algunas tecnologías (%).

Le da mantenimiento a su:		¿Sigue en uso su cosecha de agua?	
		Sí	
Cosecha de agua	Sí	57.1	
	No	39.3	
	No contestó	3.6	
	Total	100.0	
		¿Sigue en uso su cisterna?	
		Sí	
Cisterna	Sí	56.3	
	No	40.6	
	No contestó	3.1	
	Total	100.0	

		¿Sigue en uso su baño seco?
		Sí
Baño seco	Sí	80.6
	No	12.9
	No contestó	6.5
	Total	100.0

El segundo caso de interacción con las tecnologías es el de las adaptaciones (el criterio de flexibilidad del que hablan Murphy *et al.*, 2009) que les hayan hecho los pobladores. Cuando en una vivienda se encuentran todas las tecnologías en uso, poco menos de la mitad de éstas han tenido adaptaciones, como se aprecia en la Figura 12. Lo importante a resaltar en este punto es que teniendo todas las tecnologías en funcionamiento o hasta tres en desuso, ha existido la adaptación de las mismas. La única excepción es cuando hay cuatro tecnologías en desuso, lo que puede dar pistas de la falta de interés en las tecnologías apropiadas.



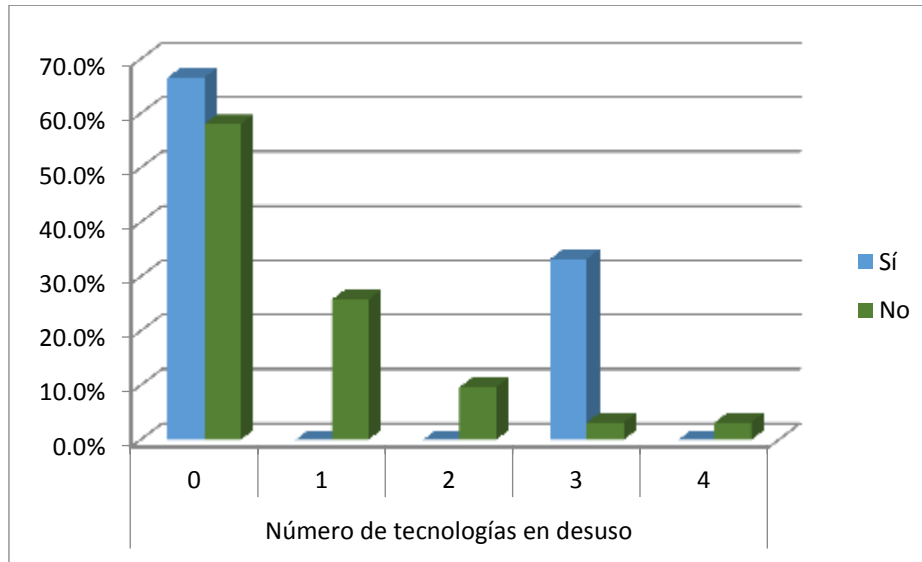
**Figura 12.** Modificaciones a alguna de las tecnologías y número de tecnologías en uso/desuso (%).

#### **d) Organización social y funcionamiento de las tecnologías**

Otro de los aspectos relevantes que se exploró se refiere a la formación de una organización social durante el desarrollo del proyecto y su relación con el funcionamiento de las obras. La idea subyacente en esta relación es que la existencia de alguna figura organizativa (socialmente formada, es decir, comunal) podría contribuir a mejorar el funcionamiento de las obras toda vez que esta organización serviría como *catalizadora de las acciones* de las instituciones que intervinieron en la introducción de las tecnologías.

Esta idea, según los datos de la encuesta (Figura 13), arroja datos contradictorios, pues correlacionando los datos obtenidos de funcionamiento actual de la organización social (comité) y el funcionamiento actual del número de tecnologías no existe una relación directa entre la organización social y el funcionamiento de las tecnologías. O, mejor dicho, aunque no exista una organización social comunitaria formada, las tecnologías siguen funcionando. Aunque en dos casos, en el del funcionamiento de todas las tecnologías y en el desuso de tres, los datos arrojan que el mayor el número de tecnologías está en uso cuando el comité también sigue funcionando. Y es menor el número de tecnologías que funciona cuando el comité tampoco lo hace.





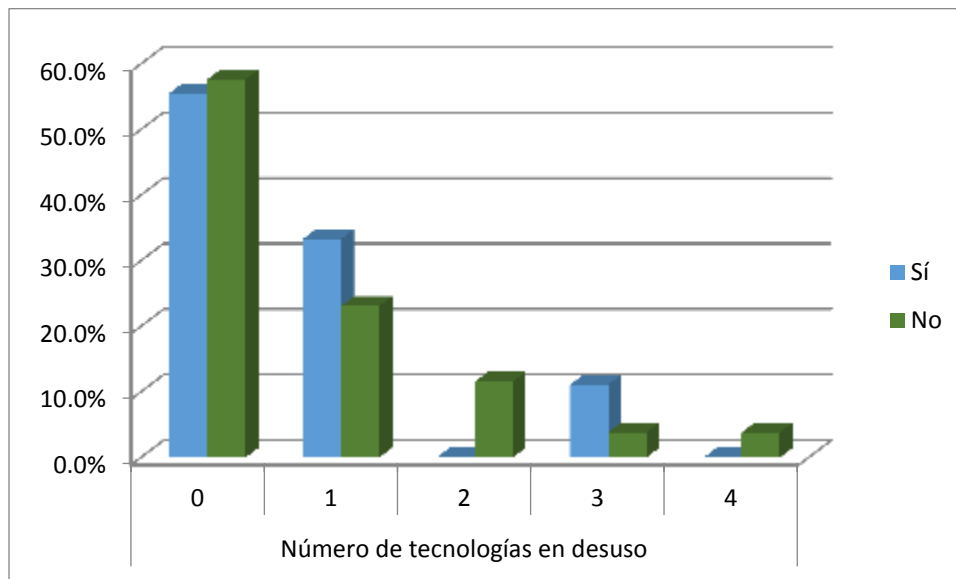
**Figura 13.** Organización social y tecnologías en uso/desuso (%).

En este caso, la explicación de la inexistencia de vínculos entre la creación o existencia de una figura organizativa y el funcionamiento de las tecnologías quizá estriben en que estas últimas cumplen una satisfacción familiar, en donde una organización puede tener nula incidencia sobre el uso, operación y funcionamiento de las tecnologías. Es decir, en estos casos puede corresponder más a los miembros de las familias beneficiadas el uso correcto de sus tecnologías, pues de ese buen uso y adecuado funcionamiento dependerá el nivel de servicio que éstas le proporcionen. Aunque, por lo explicado más arriba, los datos no son concluyentes en tal sentido.

### e) Replicabilidad de las tecnologías

Una de las dimensiones de la adopción social es la replicabilidad tecnológica, es decir, la capacidad de los pobladores de construir las mismas tecnologías en otras viviendas. La replicabilidad comienza con el

convencimiento de que ciertas tecnologías atienden necesidades familiares y que su bienestar puede ser reproducido en otros contextos familiares. La replicabilidad se da en dos niveles: el primero es el de la promoción de las tecnologías que han servido al seno de la localidad y, por otro lado, la construcción en otras viviendas de las tecnologías. Algunos visos de replicabilidad se muestran en la Figura 14, donde se aprecia una tendencia a promover y construir nuevas tecnologías en otras viviendas, aunque las tendencias mayores se tienen cuando hay 1 o 3 tecnologías en desuso. Cuando todas las tecnologías funcionan, el porcentaje de replicabilidad ha sido menor.



**Figura 14.** Promoción o construcción de estas tecnologías en otra vivienda y número de tecnologías en uso/desuso (%).

## Conclusiones

Después de la revisión de los datos de la encuesta aplicada en Chitejé de Garabato, es posible relacionar el concepto y la aplicación de la adopción social de tecnologías apropiadas.

El primer punto a destacar es que un enfoque de este tipo sobre introducción de tecnologías debe poner énfasis en todo el proceso (que va desde la elección del sistema tecnológico hasta la evaluación de largo plazo, como se verá más adelante) de la relación entre la tecnología y el beneficiario, sin dejar de tomar en cuenta que esta relación atiende una *necesidad básica específica*, o un conjunto de necesidades básicas. Se trata, entonces, de *poner énfasis en la atención y satisfacción de necesidades, y no en el funcionamiento óptimo de una tecnología per se*.

Como se observa en el caso de Chitejé de Garabato, las familias mantenían sus sistemas en funcionamiento, siempre y cuando les ayudaran a satisfacer una necesidad. De ahí que ciertas tecnologías se utilizaran en mayor o menor medida, y que otras hayan dejado de funcionar. Si se regresa a los planteamientos de la adopción social de las tecnologías apropiadas, que se enunciaron al inicio de este artículo, se encuentra que son insuficientes. Se habían mencionado antes siete dimensiones: atención a una necesidad, sustentabilidad tecnológica, replicabilidad, participación activa, capacitación, interacción y organización social.

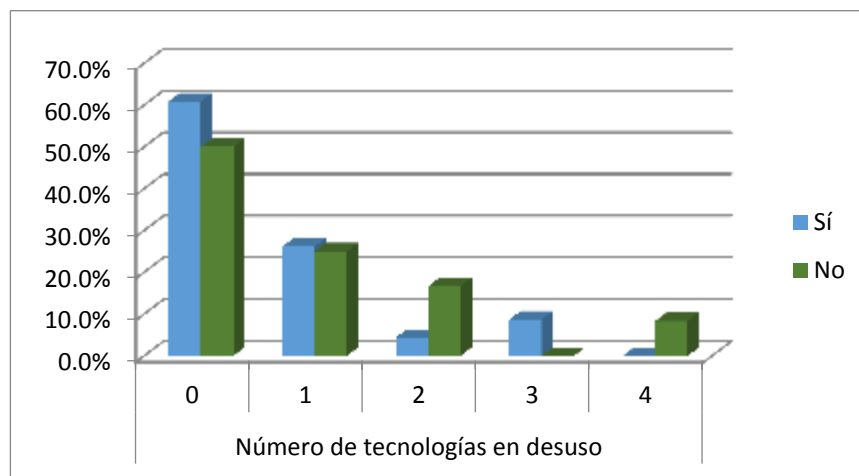
Utilizando los datos obtenidos en el caso de estudio se puede hacer énfasis en estas dimensiones y en una más, observadas a partir de los datos expuestos: la correlación de información y los supuestos del enfoque de adopción social. La primera es la de satisfacción de una necesidad básica, que ya ha sido mencionada. Por cierto, preguntar, a través de una encuesta o un cuestionario, por la satisfacción del destinatario no es hacerlo por la atención permanente o por la solución a una necesidad básica. Preguntar, en todo caso, por la satisfacción del uso de cierta tecnología lleva, de nueva cuenta, a centrar la atención en el aparato tecnológico y no en la relación entre éste, el usuario y la necesidad atendida.

Las restantes dimensiones que se refieren son la sustentabilidad de la tecnología (duración y funcionamiento en el tiempo, que para el caso de la adopción social tendería a ser a largo plazo y en donde se incorpora una dimensión temporal); la dimensión de la interactividad (entre el beneficiario y la tecnología); la participación activa de los pobladores; la

capacitación (ambas presentes en el caso de Chitejé de Garabato), y la organización social, que parece requerir de más estudios de caso para observar una tendencia marcada hacia el papel de los comités formados a partir de la introducción de sistemas tecnológicos apropiados a localidades rurales.

Una interpretación, según los datos obtenidos en Chitejé de Garabato, es que existen escalas de decisión en las localidades y una escala de decisión se toma al interior de las viviendas en donde se han construido tecnologías; en ello no priva, necesariamente, una organización social comunitaria.

Tal vez al hablar de organización social en futuros estudios deba tomarse en cuenta la organización familiar o, como lo mencionan Warriner y Moul (1992), los lazos de parentesco. Lo cierto es que, según los pobladores, ha habido una tendencia al fortalecimiento de la organización social en Chitejé de Garabato, como se muestra en la Figura 15.



**Figura 15.** Fortalecimiento de la organización comunitaria y tecnologías en uso/desuso (%).

Hay una dimensión más que ha sido invisibilizada y subjetiva, que se puede incorporar al proceso tecnológico de la adopción social: *la del ímpetu al cambio* de los destinatarios de los sistemas tecnológicos. Esta dimensión aparece cuando existe el interés de los pobladores, marcado

por la construcción de las tecnologías hasta los procesos de replicabilidad tecnológica.

En el caso de Chitejé de Garabato es posible hablar de que existe un alto índice de ímpetu al cambio, que si bien no ha sido medido a través de la encuesta, el cruce de datos lo ha hecho resaltar: 91% de las tecnologías construidas sigue funcionando y poco más de la mitad ha tenido modificaciones hechas por los propios pobladores; asimismo, las tecnologías han sido difundidas y construidas en otras viviendas (dimensión de replicabilidad).

Así, es factible resaltar además dos elementos importantes en el proceso de adopción social de la tecnología en Chitejé de Garabato: la dimensión temporal (sustentabilidad) y una dimensión perceptiva, que se explica como una atención continua a una necesidad básica, más allá de la satisfacción inmediata del destinatario por el uso de tal o cual tecnología. Se podría decir que aunque muchos programas de introducción de sistemas de agua potable y saneamiento suelen ser paliativos, en los casos donde hay una adopción social de la tecnología, como en Chitejé de Garabato, hay una continuidad en la atención de una necesidad y ello se transforma en una dimensión temporal que nada tiene que ver con lo paliativo.

Al ir más allá, se podría decir que las soluciones tecnológicas paliativas son abandonadas en pro de las que muestran durabilidad temporal y sustentabilidad. Tal es el caso de la tendencia al abandono de los biofiltros o de las ollas solares, en el caso de Chitejé de Garabato.

Todas estas consideraciones van más allá de la tradicional concepción de la transferencia tecnológica, y lo que se espera de los beneficiarios y del proceso mismo: una participación social activa y real, reconocer los conocimientos de los destinatarios y la sustentabilidad ambiental.

Es necesario reconocer que entran en juego muchos más elementos y que requieren de acercamientos multifactoriales (Willoughby, 1990: 284). No tomar en cuenta esta multifactorialidad puede hacer que las tecnologías transferidas no sean utilizadas o dejen de funcionar. De hecho, cuando las tecnologías son abandonadas por múltiples razones, invierten su papel de atención a una necesidad básica y se convierten en basura tecnológica, en construcciones sin uso o con problemas, que pueden derivar en contaminación o afectación a la salud de los

pobladores. En estos casos, que son más orientados la mayoría de las veces por procesos y enfoques de transferencia y de apropiación tecnológica, la sustentabilidad se convierte en negativa; se podría hablar de afectación al ambiente y a los pobladores, en lugar de atender una necesidad básica. La tecnología no funcional o abandonada se convierte así en signo de deterioro ambiental y en obvio fracaso de transferencia tecnológica.

Este estudio de caso lanza una señal de que puede hablarse y crearse un índice de adopción social de tecnologías apropiadas, pero ello no será posible sino una vez correlacionando datos de otros estudios en específico, para avanzar en el entendimiento de las dinámicas e interrelaciones sociales, tecnológicas y cognitivas que se dan entre los usuarios y las tecnologías apropiadas que utilizan para atender necesidades específicas, como tener agua para uso doméstico y los aspectos relacionados con el saneamiento en sus viviendas.

## Referencias

- Alam, M. (2013). Theorizing the social acceptance of appropriate technology. *Warta KIML*, 11(1), 81-92.
- Carr Jr., V.H. (2016). *Technology Adoption and Diffusion*. Recuperado de <https://eric.ed.gov/?id=ED453360>
- CEAQ, Comisión Estatal de Agua de Querétaro. (26 de abril de 2013). *Agua para todos: construyendo un modelo de desarrollo sustentable internacional. Reglas de operación Programa "Agua Cerca de Todos"*. Querétaro, México: Comisión Estatal de Agua de Querétaro.
- CEAQ, Comisión Estatal de Agua de Querétaro. (s/f). "Compromiso México" Premio de Agua. *Rumbo al establecimiento de políticas locales públicas para el suministro de agua y saneamiento*. Querétaro, México: Comisión Estatal de Agua de Querétaro.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2016). *Mujeres trabajando por una gestión sustentable del agua en comunidades rurales: Chitejé de Garabato, Querétaro*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.

- CDI, Comisión para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. (2010). *Catálogo de localidades indígenas*. México, DF, México: Comisión para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Conapo, Consejo Nacional de Población. (2012). *Índice de marginación por localidad 2010*. México, DF, México: Consejo Nacional de Población.
- De Luca, M. J. (April, 2012). *Appropriate technology and adoption of water conservation practices: Case study of greywater reuse in Guelph* (thesis of Master of Science in Engineering). The University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada.
- Diario Oficial de Gobierno del Estado. (28 de abril de 2010). Querétaro. Diario Oficial de Gobierno del Estado. Acuerdo por el cual el secretario de planeación y finanzas del poder ejecutivo del estado de Querétaro, emite los lineamientos generales del programa soluciones.
- Driesen, D. M., & Popp, D. (2010). Meaningful technology transfer for climate disruption. *Journal of International Affairs*, 64(1), 1-16.
- García-Vargas, M. (2014). De la apropiación de tecnología a la gestión del conocimiento. Retos en la gestión comunitaria del agua y el saneamiento. En: Romero-Pérez, R. & Soares-Moraes, D. (coords.). *Los retos de la adopción tecnológica en el sector hídrico de Latinoamérica*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Gobierno del Estado de Querétaro. (2013). *Plan Municipal de Desarrollo 2013-2015, Amealco de Bonfil, Querétaro*. Recuperado de [http://www.amealco.gob.mx/a/?page\\_id=587](http://www.amealco.gob.mx/a/?page_id=587)
- Grieve, R. H. (2004). Appropriate technology in a globalizing world. *International Journal of Technology Management and Sustainable Development*, 3(3), 173-187.
- Guzmán, D. (2014). *Mujeres y medio ambiente. Cambios culturales en el manejo y apropiación de un proyecto sustentable* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. INEGI, Instituto Nacional

- de Estadística y Geografía. (2005). *II Censo de Población y Vivienda 2005*. INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*.
- Lawal, Y. O. (November, 2010). Poverty alleviation and the use of appropriate technology. *International Journal of Academic Research*, 2(6).
- López-Ramírez, E., & Moya-Fonseca, L. A. (2013). *Verificación de la sostenibilidad de los servicios proporcionados dentro del marco del Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales (PROSSAPyS), durante el periodo 2008-2011. Informe Final*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez-Ruiz, J. L., Murillo-Licea, D., Starkl, M., López, R., & Libeyre, N. (July-December, 2010). The problem of the social adoption of appropriate technologies in Villa Nicolás Zapata. *Plurimondi*, (7), 125-155.
- Murillo-Licea, D., & Martínez, J. L. (July-December, 2010). From pre-hispanic technologies to appropriate technologies. *Plurimondi*, (7), 105-123.
- Murphy, H., McBean, E., & Farahbakhsh, K. (May, 2009). Appropriate technology – A comprehensive approach for water and sanitation in the developing world. *Technology in Society*, 31(2), 158-167.
- Ortiz-Moreno, J. A., Masera-Cerutti, O. R., & Fuentes-Gutiérrez, A. F. (2014). *La ecotecnología en México*. México, DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México-Centro de Investigaciones en Ecosistemas.
- Pérez de Armiño, K.; Zabala, N. (s/f), "Tecnología apropiada", *Diccionario de acción humanitaria y cooperación al desarrollo*, <http://dicc.hegoa.efaber.net>.
- Ryan, F. A., & Vivekananda, F. (1993). *Finding new routes in old paths: Linking cultural needs to technical knowledge appropriate technology inspires developing societies concept, controversy, and clarification*. New York, USA: Bethany Books.
- Thomas, H. (jullho de 2011). Tecnologías sociales y ciudadanía socio-técnica. Notas para la construcción de la matriz material de un



- futuro viable. *Revista do Observatório do Movimento pela Tecnologia Social da América Latina*, 1(1), 1-22.
- UAQ, Universidad Autónoma de Querétaro. (s/f). *Diagnóstico de factibilidad social de hidrotecnologías y proceso de capacitación tecnológica en la Sierra Gorda de Querétaro (municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Landa de Matamoros y Pinal de Amoles)*. Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Vega-Encabo, J. (septiembre de 2004). "Traslación" y adaptación de técnicas. Tecnologías apropiadas y procesos de transferencia. *Revista CTS*, 3(1), 51-71.
- Viatte, G. (2011). Adopting technologies for sustainable farming systems: An OECD perspective in adoption of technologies for sustainable farming systems, *Wageningen Workshop Proceedings* (pp. 15-24), OECD, France.
- Warriner, G. K., & Moul, T. M. (1992). Kinship and personal communication network influences on the adoption of agriculture conservation technology. *Journal Rural Studies*, 9(3), 279-291.
- Willoughby, K. (1990). *Technology choice. A critique to Appropriate Technology Movement*, London, UK: Westview Press.

**Tratamiento biológico de desnitrificación de aguas residuales usando un reactor de biopelícula con cáscara de arroz como fuente de energía**

**Biological treatment of denitrification in wastewater using a biofilm reactor with rice shell as energy source**

Joseph J. Sánchez-Balseca<sup>1</sup>

Isaías M. Muñoz-Rodríguez<sup>2</sup>

María Belén Aldás-Sandoval<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador,  
joseph.sanchezb@epn.edu.ec

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, marcelo.munoz@epn.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0003-1457-6492>

<sup>3</sup>Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, maria.aldas@epn.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-0191-9647>

Autor para correspondencia: Joseph J. Sánchez-Balseca,  
joseph.sanchezb@epn.edu.ec

## Resumen

Se evaluaron dos sistemas de tratamiento biológico de desnitrificación en aguas residuales utilizando reactores anaerobios de biopelícula con diferente fuente externa de energía. El primer sistema empleó metanol como fuente de carbono (sistema convencional) y, el segundo, sustrato de cáscara de arroz; ambos operaron con tiempos de retención hidráulicos de 2.38, 5.56, 6.67, y 8.33 horas, con una alimentación de nitratos de 40 mg NO<sup>3-</sup>/l. El sistema con sustrato de cáscara de arroz tuvo mayor eficiencia en la remoción de nitratos, con 97.58%, mientras que el sistema con metanol tiene una eficiencia de 93.46%, para el mismo tiempo de retención. Los dos sistemas tienen un comportamiento similar en la remoción de carga orgánica, con una eficiencia máxima de 94%. La

concentración de biomasa en el reactor con sustrato de cáscara de arroz es 14 286 mg/l, siendo mayor a la del reactor con metanol, que es de 10 220 mg/l. El coeficiente de producción de biomasa,  $Y$ , es de 0.007, y de 0.0045 para el reactor con metanol y con cáscara de arroz, respectivamente, lo que indica una baja generación de lodo.

**Palabras clave:** desnitrificación, cáscara de arroz, biopelícula, tratamiento biológico de aguas residuales, metanol, producción más limpia.

### **Abstract**

Two systems of biological treatment of denitrification in wastewater were evaluated, using anaerobic biofilm reactors with different external energy source. The first system used methanol as carbon source and the second used a substrate of rice shell. Both systems operated with hydraulic retention times of 2.38, 5.56, 6.67 and 8.33 hours and a supply of 40 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ . The system with substrate of rice shell presented high nitrate removal efficiency, of 97.58%, and the system with methanol had an efficiency of 93.46%, for the same retention time. The systems had similar performance in the organic load removal, with a maximum efficiency of 94%. The biomass concentration in the reactor with the substrate of rice shell, with a value of 14 286 mg/l, is higher than the one in the reactor with methanol, with a value of 10 220 mg/l. The mass production coefficient,  $Y$ , was of 0.007 and 0.0045, for the reactor with methanol and the reactor with substrate of rice shell, respectively, representing a low generation of sludge.

**Keywords:** denitrification, rice shell, biofilm, biological treatment of wastewater, methanol, cleaner production.

Recibido: 04/08/2017

Aceptado: 31/07/2018

## **Introducción**

Producto de la industrialización y producción a gran escala se ha incorporado una alta concentración de nitratos en el recurso hídrico, degradando su calidad y, por lo tanto, la salud humana (OMS, 2003).

Los tratamientos de depuración que existen en la actualidad se clasifican en físico-químicos y biológicos, pero la problemática de los tratamientos físico-químicos es la transformación de contaminantes en otros más o menos perjudiciales; mientras que los tratamientos biológicos degradan el contaminante en sus componentes básicos, ayudando a cerrar los ciclos de vida de los elementos (Pozo, 2008).

Considerando que en el Ecuador poca importancia se ha dado a la investigación para el desarrollo de tratamientos de depuración terciarios de aguas residuales, y dentro de éstos, los biológicos de desnitrificación, se ha procedido a replicar modelos estudiados en otros países sin considerar el contexto de materias primas existentes y útiles en el país, haciendo que la aplicabilidad de estas tecnologías sean muy costosas (Gervacio, 2007).

La tecnología que hace uso de reactores anaerobios de biopelícula en la actualidad trabaja con metanol como fuente de energía para el desarrollo biológico, así como también para la degradación de nitratos; el metanol es un compuesto costoso y su aplicación a gran escala lo hace un producto de difícil manipulación; estos factores limitan la aplicabilidad de tales sistemas de depuración en el Ecuador (Ávila, Razo, & Gómez, 2003).

Como alternativa al uso de sustancias químicas antes mencionadas aparece el uso de materiales naturales, como astillas de madera, aserrín, paja, algodón, mazorcas de maíz, algas marinas, cortezas, etcétera, que debido a su bajo costo, disponibilidad y comprobada eficiencia están siendo investigados en proceso de remoción de nitratos (Wang & Chu, 2016).

Si no se considera evaluar el comportamiento de materias existentes en la producción interna del Ecuador para el aporte de energía en los tratamientos terciarios de reactores de biopelícula para desnitrificación; no se crearán tecnologías más económicas y aplicables en el país, y las tasas de enfermedades producidas por una alta concentración de nitratos en el agua no decrecerán; por ejemplo, la cantidad de niños recién nacidos que padecen la enfermedad del "bebé azul", producto de la interacción de los nitratos con la hemoglobina, ha incrementado la tasa de mortalidad en los recién nacidos; asimismo, se ha identificado casos de trastornos en las mujeres embarazadas cuando ingieren cantidades altas de nitratos, principalmente malformaciones que afectan al sistema nervioso central, al

muscular o al óseo (OMS, 2003).

Otro de los temas que favorece una alta concentración de nitratos en el agua es la eutrofización de los recursos hídricos; producto de la acción antrópica, el nivel de calidad de vida disminuirá en ríos, lagos, estuarios, etcétera (Romero, 2010). Si se realiza la evaluación de materias que sustituyan al metanol, aportando la cantidad de energía apropiada a las tecnologías biológicas de depuración de aguas residuales, los costos que involucran los tratamientos terciarios disminuirán y su aplicabilidad en el contexto ecuatoriano será una realidad, disminuyendo y eliminando las enfermedades producidas por la interacción entre el ser humano y la concentración de nitratos; también fortalecerá la gestión integral del recurso hídrico debido al control de la eutrofización.

Frente a lo expuesto, esta investigación propone fortalecer la teoría de producción limpia (Rojas & Leopoldo, 2012). Se utilizaron desperdicios de la industria, con el propósito de ser fuente de energía en procesos de tratamiento de aguas residuales con alto contenido de nitratos; específicamente se utilizó la cáscara de arroz, residuo de la industria arrocera en el Ecuador, para ser utilizada como fuente de energía en los procesos microbiológicos de depuración de aguas.

El alcance de la investigación es determinar el comportamiento de la remoción de altas concentraciones de nitratos mediante la evaluación comparativa del proceso de desnitrificación en un sistema compuesto por un reactor anaerobio de biopelícula con fuente externa de carbono de cáscara de arroz, y un sistema compuesto por un reactor anaerobio de biopelícula con fuente externa de carbono de metanol. Los reactores fueron evaluados en modelos de laboratorio.

Se pretende así sustituir el metanol que actúa como fuente de energía externa convencional para el proceso de desnitrificación, con el objetivo de proporcionar una alternativa económicamente factible y aplicable en los tratamientos secundarios de depuración de aguas en el contexto ecuatoriano.

## **Materiales y métodos**

Se construyeron dos modelos similares de reactores, difiriendo en la fuente de carbono que se adiciona, para que se produzca el proceso de desnitrificación; uno de los sistemas trabajó con metanol y el otro lo hizo con una fuente orgánica de sustrato: la cáscara de arroz.

La operación simultánea de estos dos modelos permitió evaluar el funcionamiento, desarrollo y eficiencia del proceso de desnitrificación. Los modelos de reactores construidos en laboratorio se diseñaron con un volumen de 1 l; este valor consideró el caudal máximo utilizado en la presente investigación, y que se relaciona de modo directo con el tiempo de retención referido por la bibliografía (Antoine, 1974).

Se utilizó grava fina (5-10 mm) como material para distribuir de forma uniforme el flujo de la solución acuosa dentro de los reactores, así como del contenedor del material carbonoso (cáscara de arroz), suficiente para cubrir una altura de 3.5 cm. El material que se empleó como medio de soporte de la biomasa es tereftalato de polietileno, en unidades cuadradas de 2 cm de lado; el tereftalato de polietileno es un material inerte.

El rango de concentración de nitratos en el agua de ingreso al sistema que se consideró como referencia es de 30 a 40 mg/l; este rango corresponde al nivel de nitratos presentes en el agua residual doméstica completamente nitrificada (Cuevas & Tejero, 2007).

Se consideraron como alternativas de compuestos químicos a ser utilizados para nitrificar el agua (40 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ ) al nitrato de sodio y al nitrato de potasio. La opción más adecuada fue el nitrato de sodio debido a que mantiene el valor del potencial hidrógeno más alto que el nitrato de potasio; además, la cantidad de nitrato de sodio por litro de agua que se requiere para nitrificarla es menor.

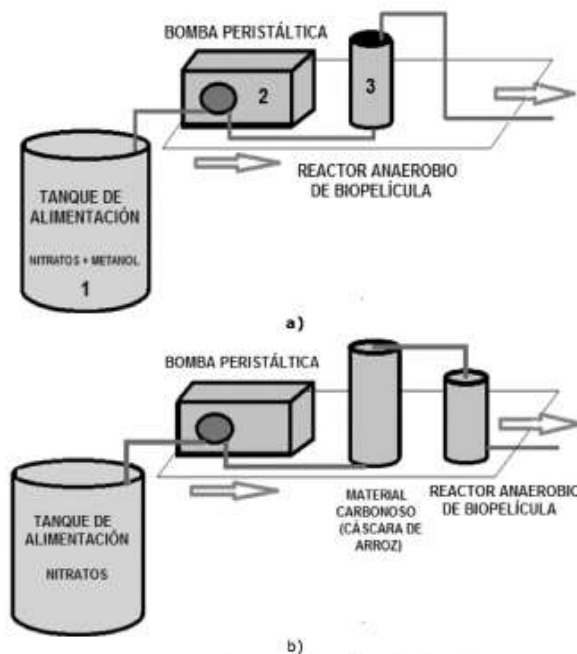
La cantidad de metanol que se requiere para realizar de manera adecuada el proceso de desnitrificación está basado en los estudios de laboratorio que McCarty desarrolló a través de una ecuación empírica que describe la reacción general de remoción de nitrato (Metcalf & Eddy, 1972). Utilizando la ecuación empírica se requirió de 0.028 ml de metanol por cada litro de agua alimentada al sistema para que se realice de manera adecuada el proceso de desnitrificación.

El parámetro de la demanda química de oxígeno, derivada de la alimentación de metanol, permitió modelar la cantidad de material orgánico en el sistema de desnitrificación con fuente de energía externa de sustrato de cáscara de arroz. Se realizaron pruebas que relacionaron el volumen de los envases con la materia orgánica (cáscara de arroz) y los

valores de DQO; se encontró que un volumen de tres litros de materia carbonosa tiene un valor de DQO semejante al valor referencial, que es de 70 mg/l, que corresponde a la solución de metanol con el agua.

Los parámetros de control considerados más importantes en el proceso de desnitrificación fueron los siguientes: temperatura, concentración de nitratos, demanda química de oxígeno soluble, potencial hidrógeno tanto en el afluente como en el efluente; asimismo, se realizó el análisis de sólidos al lodo resultante de la investigación (Suarez & Jácome, 2007); esto permitirá desarrollar un análisis comparativo entre los dos modelos que poseen distinta fuente externa de carbono en su funcionamiento, al igual que la eficiencia obtenida con cada uno de los modelos de laboratorio diseñados.

Para la medición de los parámetros físicos y químicos de la presente investigación se utilizaron los métodos propuestos por la Asociación Americana de Salud Pública, la Asociación Americana de Trabajos en Agua, y la Federación de Agua Ambiental, en su libro "Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Agua Residual" (1999). En la Figura 1 se muestra un esquema de la instalación de los dos reactores.



**Figura 1.** Esquema de instalación de los birreactores: a) con metanol, b) con cáscara de arroz.

En la Figura 1a se observa el esquema del reactor anaerobio alimentado con metanol, el mismo que es mezclado con el agua en el tanque de alimentación. La capa que constituye el medio de soporte del reactor estuvo contenida en un volumen de un litro; la capa de grava fina no se considera en el volumen del reactor.

Para la operación del reactor anaerobio de biopelícula con medio de soporte y sustrato de cáscara de arroz como fuente externa de energía, que se observa en la Figura 1b, se necesitó la implementación de un recipiente preliminar al reactor que contenga el material carbonoso: la cáscara de arroz. Este reactor fue construido con flujo descendente, manteniendo las mismas características del reactor anaerobio con fuente externa de energía de metanol. En la Tabla 1 se describen las características de construcción de los reactores.

**Tabla 1.** Dimensiones de los reactores anaerobios alimentados con metanol, y con cáscara de arroz y del recipiente contenedor del material carbonoso.

Magnitud	Unidades	Reactor con metanol	Reactor con cáscara de arroz	Contenedor material carbonoso
Diámetro del reactor	cm	12	12	14
Altura de la grava fina	cm	3.5	-	3.5
Altura del medio de soporte	cm	8.9	8.9	-
Altura del material carbonoso	cm	-	-	16
Volumen total del reactor	L	1	1	3
Área específica	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	960	1 075.95	-
Volumen útil del reactor	l	0.91	0.91	-

El tiempo de retención de funcionamiento para los reactores anaerobios es el mismo para ambos sistemas. La variación del tiempo de retención hidráulico está en relación directa con el caudal de alimentación. El rango que se consideró para el análisis fue tiempo de retención de 2.38 a 8.33 horas y un caudal de 7 a 2 ml/min; se consideró este rango debido a que a valores más altos de 7 ml/min, la eficiencia de la desnitrificación era de



cero, y el mínimo caudal que se alcanzó con la bomba peristáltica fue de 2 ml/min, valores aplicados para un volumen de reactor de un litro.

El periodo de funcionamiento es la duración en la que el sistema de desnitrificación funciona en un mismo tiempo de retención hidráulico y caudal. En el arranque del reactor, al caudal inicial de 7 ml/min, se utilizó el periodo más largo, pues se esperaba que se realizara la aclimatación y estabilización de los microorganismos al nuevo medio. Además, se hicieron muestreos para determinar el valor de cada parámetro en periodos de cuatro horas (seis análisis por día). En la Tabla 2 se muestran los tiempos de retención y el periodo de funcionamiento de los reactores.

**Tabla 2.** Tiempos de retención y caudales de funcionamiento.

Tiempo de retención	Caudal	Periodo de funcionamiento
h	ml/min	D
2.38	7	55
5.56	3	17
6.67	2.5	19
8.33	2	21

## Resultados

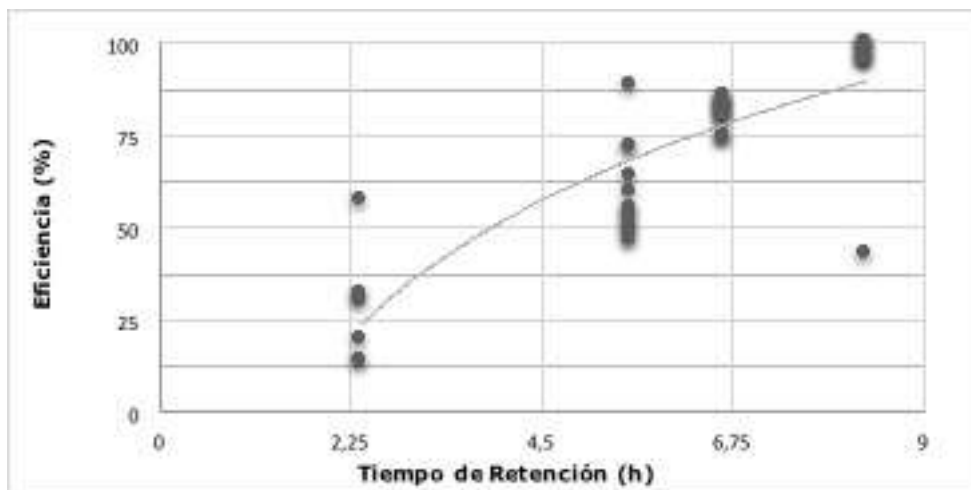
### Reactor con sustrato de metanol (R1)

En promedio, la concentración de nitratos en el efluente a un tiempo de retención hidráulico de 2.38 horas es de 23.14 mg/l, con una eficiencia promedio de 28.47%; para un tiempo de retención hidráulico de 8.33 horas es de 2.21 mg NO<sup>3-</sup>/l, con una eficiencia promedio de remoción de 93.46%.

El presente análisis tiene como nivel de referencia para agua potable el valor indicado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) (10 mg/L) (EPA, 2012).

Tomando el nivel de referencia de la EPA para agua potable, los tiempos de retención hidráulico van desde 6.67 horas, con una eficiencia de 81.46%. A continuación se presenta en la Figura 2 el comportamiento de la eficiencia de remoción de nitratos para R1.

Como se observará, para cumplir con el límite establecido por la EPA, se requiere una eficiencia mayor a 70% y un tiempo de retención hidráulico mayor a seis horas; en todo caso, si se requiere una mayor remoción de nitratos se debe aumentar el valor del tiempo de retención, al igual que los parámetros relacionados.

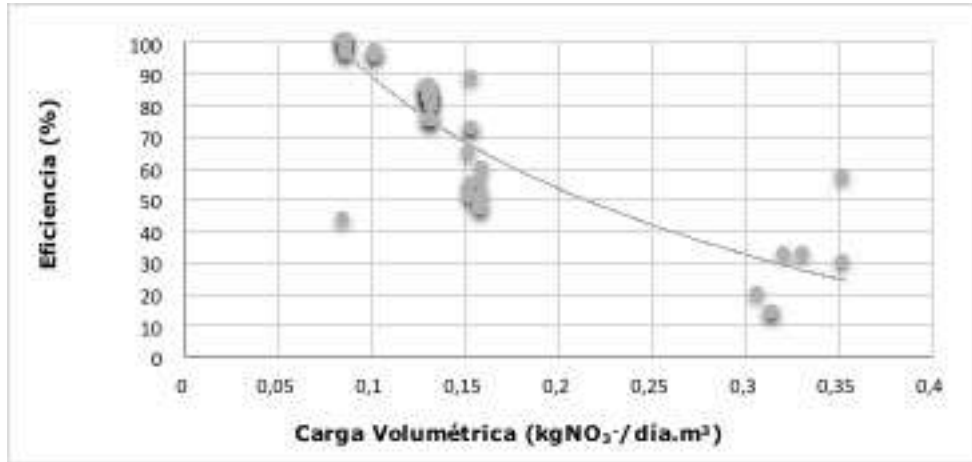


**Figura 2.** Eficiencia de desnitrificación para R1.

La curva de eficiencia de la desnitrificación se ajusta a una ecuación logarítmica, de la forma:

$$\% \text{ Eficiencia} = 52.537 \times \ln(\text{tiempo de retención}) - 21.535 \quad (1)$$

Al ser la eficiencia de remoción de nitratos inversamente proporcional al caudal, la carga volumétrica también lo es, obedeciendo a una curva logarítmica, que se aprecia en la Figura 3.



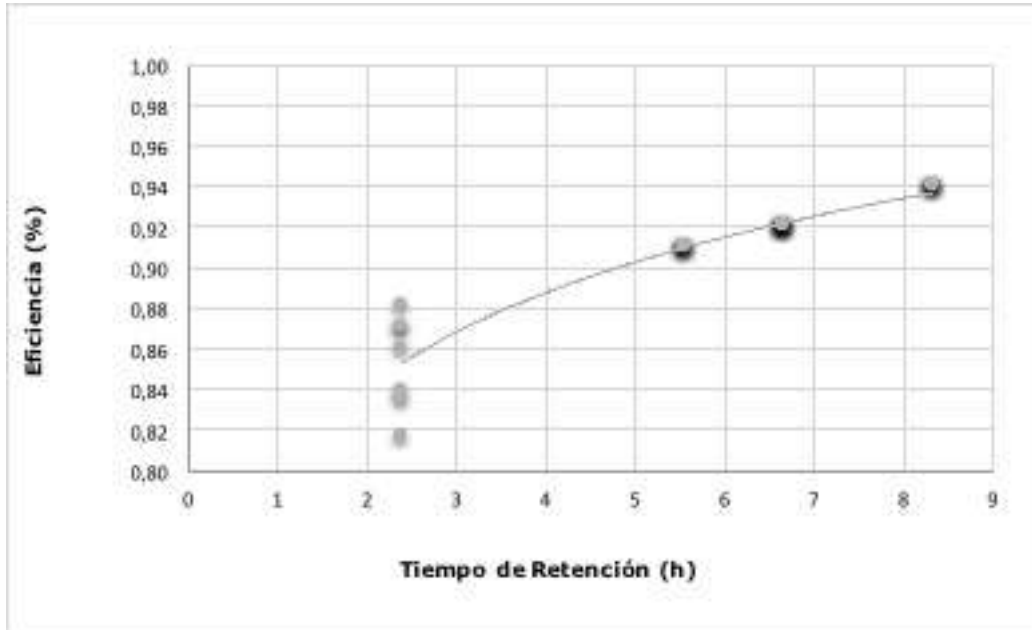
**Figura 3.** Eficiencia de desnitrificación vs. carga volumétrica.

El parámetro de carga volumétrica presenta valores de 0.086 a 0.30 kg NO<sup>3-</sup>/m<sup>3</sup>.día, a tiempos de retención hidráulicos de 8.33 horas y 2.38 horas, respectivamente, teniendo un valor promedio de 0.16 kg NO<sup>3-</sup>/m<sup>3</sup>.día.

La carga volumétrica es inversa al tiempo de retención hidráulico. La curva logarítmica que se genera es:

$$\% \text{ Eficiencia} = -51.68 \times \ln(\text{carga volumétrica}) - 29.4 \quad (2)$$

El R1 presenta además valores de eficiencia de remoción de material orgánico satisfactorios. El rango de eficiencias de remoción de material orgánico es de 82 a 94%, a tiempos de retención de 2.38 a 8.33 horas, respectivamente, con un valor promedio de 91%, valores que pueden observarse en la Figura 4.



**Figura 4.** Remoción de materia orgánica vs. Tiempo de retención.

Los porcentajes de remoción de la materia orgánica son mayores a los alcanzados en la remoción de nitratos, por lo que el efluente presenta una calidad aceptable en cuanto a concentración de DQO.

La curva logarítmica generada es la siguiente:

$$Eficiencia = 0.0672 \times \ln(\text{tiempo de retención}) + 0.79 \quad (3)$$

Del análisis de sólidos realizado se determina que 9.3 g del lodo formado en el reactor de biopelícula con fuente externa de carbono corresponde a la biomasa; 31 % de los sólidos totales está compuesto por sólidos suspendidos volátiles, es decir, el lodo se caracteriza por ser un lodo estable. En la Tabla 3 se observan los valores de los sólidos obtenidos.

**Tabla 3.** Valores para los sólidos presentes en el R1.

Tipo	Masa	Porcentaje
	g	%
Sólidos suspendidos totales, SST	29.7	100

Sólidos suspendidos fijos, SSF	20.4	69
Sólidos suspendidos volátiles, SSV	9.3	31

A partir de los valores obtenidos se calculan los siguientes parámetros:

- Relación biomasa-carga orgánica. Se determina mediante la expresión:

$$Y = \frac{\text{Biomasa}}{\text{Carga Orgánica Total}} = 0.007 \quad (4)$$

Este valor significa que por cada kg de DQO alimentado se desarrolla 0.007 kg de biomasa expresada como SSV.

- La concentración de biomasa se calcula mediante:

$$Y = \frac{\text{SSV}}{\text{Volumen útil}} = 10220 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (5)$$

Relación carga orgánica-superficie específica. La relación entre la carga orgánica y la superficie específica tiene como variable principal el tiempo de retención hidráulico, el que tiene relación con el flujo volumétrico, y con la cantidad de materia orgánica alimentada al reactor anaerobio de biopelícula; estos datos se observan en la Tabla 4, y son calculados mediante la expresión:

$$\frac{\text{Carga Orgánica}}{\text{Superficie Específica}} = \frac{[\text{DQO}] \times \text{Caudal}}{\text{Volumen reactor} \times \frac{\text{Sup.Esp.}}{\text{Volumen}}} \quad (6)$$

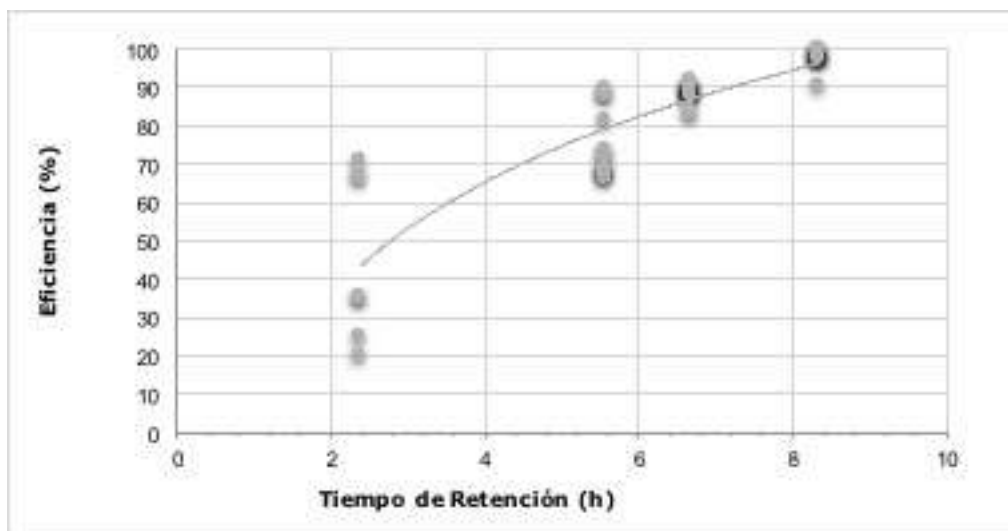
**Tabla 4.** Relación carga orgánica vs. superficie específica en función del tiempo de retención.

Tiempo de retención	Caudal	DQO prom.	Superficie específica	Carga orgánica/superficie específica
h	mL/min	mg/l	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	kg/día.m <sup>2</sup>

2.38	7	72.79	960	0.000764
5.56	3	80.86	960	0.000364
6.67	2.5	76.55	960	0.000287
8.33	2	70.43	960	0.000211

## Reactor con sustrato de cáscara de arroz (R2)

El rango de las eficiencias de remoción de nitratos en el reactor anaerobio de biopelícula con fuente externa de carbono de la cáscara es de 20.28 a 97.58%, con tiempos de retención hidráulicos de 2.38 y 8.33 horas, respectivamente, con un valor promedio de eficiencia general de 80.77%, lo que se aprecia en la Figura 5.



**Figura 5.** Eficiencia de desnitrificación para el R2.

A partir del tiempo de retención hidráulico de 5.56 horas se cumple con el nivel máximo permisible para agua potable de 10 mg NO<sup>3-</sup>/l, propuesto por la EPA (EPA, 2012). El comportamiento de este reactor es similar al

del R1, dado que con tiempos de retención hidráulicos de unas seis horas se obtiene un efluente aceptable de acuerdo con el límite indicado.

La eficiencia de remoción de nitratos en el reactor alimentado con cáscara de arroz obedece a una curva logarítmica, expresada como:

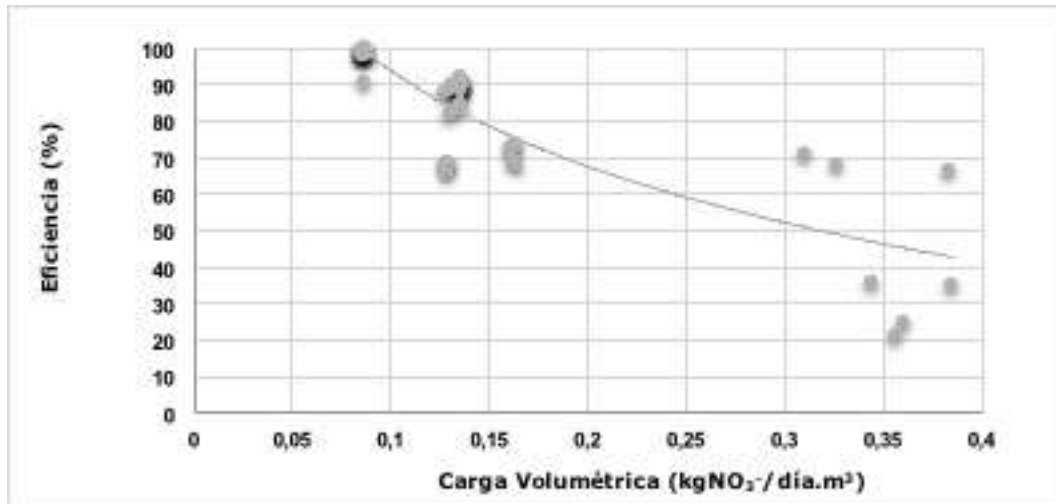
$$\% \text{ Eficiencia} = 41.9 \times \ln(\text{tiempo de retención}) + 7.11 \quad (7)$$

Los niveles de eficiencia de remoción de materia orgánica están en el rango de 92% a 94%, con un valor promedio de eficiencias de remoción de materia orgánica en el funcionamiento general igual a 93%; siendo en su mayoría constantes debido a la relación con el DQO entrante, como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Valores promedio de DQO de entrada y salida, eficiencia de remoción de materia orgánica y su relación con el tiempo de retención hidráulico.

Tiempo de retención hidráulico	DQO afluente	DQO efluente	Eficiencia
h	mg DQO/L	mg DQO/L	%
2.38	62	5	92
5.56	191	11	94
6.67	234	16.4	93
8.33	303	24	92

El rango de la carga volumétrica en el funcionamiento del reactor anaerobio de biopelícula es de 0.086 a 0.40 kg NO<sup>3-</sup>/m<sup>3</sup>.día, a tiempos de retención hidráulicos de 8.33 y 2.38 horas, respectivamente, con un valor de carga volumétrica promedio general de funcionamiento de 0.16 kg NO<sup>3-</sup>/m<sup>3</sup>.día, lo que se aprecia en la Figura 6.



**Figura 6.** Eficiencia de desnitrificación vs. carga volumétrica.

La tendencia que describe el comportamiento entre la carga volumétrica y la eficiencia de remoción de nitratos, se ajusta de manera adecuada a una curva logarítmica, así:

$$\% \text{ Eficiencia} = -38.01 \times \ln(\text{carga volumétrica}) + 6.45 \quad (8)$$

Del análisis de sólidos se determina que 12.9 g del lodo formado en el reactor de biopelícula con fuente externa de carbono corresponde a la biomasa; 25% de los sólidos totales está compuesto por sólidos volátiles, es decir, el lodo se caracteriza por ser un lodo estable. En la Tabla 6 se observan los valores de los sólidos obtenidos.

**Tabla 6.** Valores para los sólidos presentes en el R2.

Tipo	Masa	Porcentaje
	g	%
Sólidos suspendidos totales, SST	52.4	100
Sólidos suspendidos fijos, SSF	39.5	75
Sólidos suspendidos volátiles, SSV	12.9	25



Como en el caso anterior, con estos valores se calculan los siguientes parámetros:

- Relación biomasa-carga orgánica. Se determina mediante la expresión (4):

$$Y = 0.0045 \quad (4)$$

El reactor con fuente de carbono externa de cáscara de arroz genera por cada kg de DQO alimentado, 0.0045 kg de biomasa expresada como SSV.

- Concentración de biomasa, se calcula mediante la ecuación (5):

$$Y = 14286 \frac{mg}{L} \quad (5)$$

- Relación carga orgánica-superficie específica. Estos datos se calculan a partir de la ecuación (5), y se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Relación carga orgánica vs. superficie específica en función del tiempo de retención.

Tiempo de retención	Caudal	DQO prom.	Superficie Específica	Carga orgánica/ superficie específica
h	ml/min	mg/l	m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup>	kg / día.m <sup>2</sup>
2.38	7	62	1 075.95	0.00058
5.56	3	191	1 075.95	0.00077
6.67	2.5	234	1 075.95	0.00078
8.33	2	303	1 075.95	0.00081

## Discusión

De la observación de los resultados obtenidos se determinó que el sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de sustrato de cáscara de arroz cumplió con el nivel de referencia propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de 10 mg/l de nitratos, a partir de 5.56 horas de tiempo de retención hidráulico; mientras que en el sistema biológico con alimentación externa de carbono de metanol se cumple con este nivel de referencia a partir de 6.67 horas; así puede decirse que en ambos reactores un aumento en el tiempo de retención hidráulico provoca una mayor eficiencia tanto en la remoción de nitratos como en la remoción de materia orgánica (en valores cercanos a 99 y 94%, respectivamente), lo que ha sido corroborado en estudios similares (Capodaglio, Hlavínek, & Raboni, 2016).

El sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de cáscara de arroz presentó mayor eficiencia en la remoción de nitratos en todos los tiempos de retención hidráulicos analizados; esto se debe a la presencia del material carbonoso que es descompuesto en moléculas menores que después son utilizadas por los microorganismos desnitrificantes (Wang & Chu, 2016). Además, la cáscara de arroz provee una adecuada superficie para que los microorganismos formen una biopelícula sobre ella (Lu *et al.*, 2017).

Ambos reactores trabajaron con cargas volumétricas similares para cada tiempo de retención, siendo mayores las cargas a menor tiempo de retención, provocando condiciones adecuadas en los efluentes obtenidos; así, el sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de sustrato de cáscara de arroz cumple con el nivel de referencia propuesto por la EPA, de 10 mg/l cuando la carga volumétrica promedio de nitratos óptimo es igual o menor de  $0.15 \text{ kg NO}_3^-/\text{m}^3\cdot\text{día}$ ; mientras que en el sistema biológico con alimentación externa de carbono de metanol cumple con este nivel de referencia cuando la carga volumétrica promedio de nitratos óptima es igual o menor de  $0.13 \text{ kg NO}_3^-/\text{m}^3\cdot\text{día}$ .

Se evidencia la baja producción de lodo ( $Y = 0.007$  y  $0.0045$ ), y la alta concentración de biomasa en los reactores (10 220 y 14 286 mg/l), para el reactor con fuente de metanol y con fuente de sustrato de cáscara de arroz, respectivamente. Los valores de la relación biomasa-carga orgánica indican que el reactor con cáscara de arroz produjo menor cantidad de

lodos; estos valores son inferiores a los reportados en proceso de desmitificación (0.054 y 0.12) en un reactor de biopelícula (Ambrosio & Tejero, 2000). Además, presentó mayor cantidad de biomasa, lo que se ve reflejado en las eficiencias de remoción de materia orgánica, que son mayores que las del otro sistema que trabaja con metanol, indicando que a mayor generación de biomasa, la capacidad de tratamiento del sistema se incrementa (Torresi *et al.*, 2017). Se alcanzaron remociones mayores tanto de nitratos como de materia orgánica mediante el empleo de una fuente de energía poco costosa, lo que convierte a este sistema con cáscara de arroz en una alternativa tecnológica viable (Wang & Chu, 2016).

## Conclusiones

Los sistemas biológicos estudiados alcanzaron niveles adecuados de eficiencia en el proceso de desnitrificación con fuente de carbono externo. Además se encontró que ambos sistemas alcanzan altos niveles de remoción de material orgánico presente en el agua.

Se encontró que a menor tiempo de retención hidráulico en el sistema con cáscara de arroz se obtuvieron mayores eficiencias que en el sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de metanol. Por otra parte, pudo determinarse que la remoción de nitratos es más rápida en el sistema biológico que es alimentado con sustrato de cáscara de arroz, que aquella del sistema alimentado con metanol; además, la carga volumétrica de nitratos es mayor en el sistema biológico que es alimentado con sustrato de cáscara de arroz, que el sistema alimentado con metanol.

Es importante destacar la baja producción de lodo y la alta concentración de biomasa en ambos reactores, aspectos que influyen en una fácil operación del sistema. Se determinó que el uso de sustrato de cáscara de arroz como fuente de energía o de carbono en el sistema biológico de desnitrificación que se evaluó en el presente trabajo tiene la capacidad de sustituir a la fuente de carbono o de energía externa convencional del metanol debido a que presenta superiores niveles de eficiencia en la

remoción de nitratos, así como de las ventajas comparativas encontradas en la presente investigación.

Por último, debido a la facilidad de manejo, baja peligrosidad, bajo o nulo costo que representa la cáscara de arroz frente al metanol, se convierte en una alternativa económica y segura para su apropiada aplicación en tecnologías biológicas de depuración de aguas contaminadas con nitratos.

## Referencias

- Ambrosio, M., & Tejero, I. (2000). Reducción simultánea de DBO(C),  $\text{NH}_4^{4+}$  y desnitrificación en un reactor de biopelícula. *XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre, Brasil.
- Antoine, R. (1974). Nitrification of activated sludge effluent: BIO-SURF process. *Water and Sewage*, 11, 44.
- Ávila, J., Razo, E., & Gómez, J. (2003). Avances en la eliminación biológica de nitrógeno, sulfuro y materia orgánica de aguas residuales. *Revista Latinoamericana de biología*. México, DF, México.
- Capodaglio, A., Hlavínek, P., & Raboni, M. (2016). Advances in wastewater nitrogen removal by biological processes: State of the art review. *Revista Ambiente & Agua*, 11(2), 250-267.
- Cuevas, G., & Tejero, I. (2007). *Diseño, construcción y operación de un sistema con biopelículas para el tratamiento y reutilización de aguas residuales municipales*. Tampico, México: Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions.
- EPA, Environmental Protection Agency. (2012). *Las preguntas comunes y sus respuestas sobre el nitrato y el agua potable*. Yakima, USA: Environmental Protection Agency.
- Gervacio, O. (2007). *Desarrollo del sistema de desnitrificación a escala de laboratorio de muestras de aguas residuales de la empresa metropolitana de rastro de Quito usando como fuente de carbono el efluente de la primera separación de levadura de Levapan del Ecuador S.A.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Lu, Y., Zhang, X., Feng, L., Yang, G., Zheng, Z., Liu, J., & Mu, J. (August, 2017). Optimization of continuous-flow solid-phase denitrification via coupling carriers in enhancing simultaneous removal of nitrogen

- and organics for agricultural runoff purification. *Biodegradation*, 28(4), 275-285, DOI: 10.1007/s10532-017-9795-8
- Metcalf & Eddy. (1972). *Wastewater engineering*. McGraw-Hill Inc. Hong Kong: China.
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2003). *Nitrate and nitrite in drinking water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- Pozo, M. J. (2008). *Proceso de nitrificación en reactores secuenciales discontinuos SBR (Sequencing Batch Reactor) con biomasa granula*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Rojas, R., & Leopoldo, M. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7(2), 74-94.
- Romero, M. (2010). Proceso de eutrofización de afluentes y su prevención por medio de tratamiento de efluente. *Revista Ingeniería Primero*, (17), 67-74.
- Suarez, J., & Jácome, A. (2007). *Eliminación de nitrógeno de las aguas residuales. Procesos de nitrificación y desnitrificación*. Coruña, España: Universidad de Coruña.
- Torresi, E., Escolà, M., Polesel, F., Plósz, B., Christensson, M., & Bester, K. (Jan, 2017). Impact of external carbon dose on the removal of micropollutants using methanol and ethanol in post-denitrifying Moving Bed Biofilm Reactors. *Water Research*, 1, 108:95-105, DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.068
- Wang, J., & Chu, L. (2016). Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. *Biotechnology Advances*, 34(6), 1103-1112.

## **Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México** **Water conditions in the Valley of Mexico Basin**

Salvador Peña-Díaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México,  
salvadorpd@colpos.mx

Autor para correspondencia: Salvador Peña-Díaz, salvadorpd@colpos.mx

### **Resumen**

La cuenca del Valle de México es la zona más poblada del país, con más de 22 millones de habitantes, donde se genera 22% del producto interno bruto nacional. Para abastecer de agua a esta población se requiere un volumen bruto de 2 142 hm<sup>3</sup>/año y además 641 hm<sup>3</sup>/año para los usos agrícola, industrial y de otros servicios. De este volumen, 62% proviene de los acuíferos de la propia cuenca; 17%, de aguas superficiales y residuales, y el restante 21% se importa de otras cuencas. En la actualidad, dicha cuenca está sujeta a un gran estrés hídrico debido a la sobreexplotación de los acuíferos, con un volumen de 639 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa casi 40% de la extracción bruta de agua subterránea. Asimismo, la población continúa con un crecimiento, aunque moderado, de 0.6% anual. Se trata de una cuenca cerrada, lo que originó la construcción de una serie de obras para desalojar avenidas extraordinarias, iniciadas en el siglo XVII y que continúan hasta nuestros días. De los escurrimientos directos de agua superficial que se generan en la cuenca, sólo se usa 15% (95 hm<sup>3</sup>/año), pues el volumen de aguas blancas restante descarga a la cuenca del río Tula (521 hm<sup>3</sup>/año). El volumen total que se usa en el riego, incluyendo aguas residuales, es de 207 hm<sup>3</sup>/año, para una superficie de unas 24 000 ha, quedando una descarga de aguas residuales de 1 260 hm<sup>3</sup>/año,

valores aforados a la salida de la cuenca. Mediante un balance calculado por aproximaciones sucesivas para la obtención de la infiltración inducida a los acuíferos, resulta un déficit o minado de  $639 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Ante el problema de estrés al que está sujeta esta Cuenca, es necesario implementar acciones que además de contemplar la disminución del uso del agua incluya una campaña de medición que permita conocer la efectividad de acciones que se realicen. Las propuestas estructurales que se contemplan son el uso del agua superficial para la recarga de acuíferos, uso eficiente y reúso del agua. A fin de incrementar el uso del agua superficial es necesario construir presas que retengan las aguas broncas, y definir sistemas de aprovechamiento y/o zonas de recarga a los acuíferos. Respecto al reúso, se propone realizar su tratamiento y propiciar el uso en jardines y talleres de lavado de vehículos, entre otros. Lo más importante es implementar acciones encaminadas a la disminución del uso público-urbano. Además, resulta indispensable replantear los compromisos aguas abajo en la cuenca del río Tula. Los métodos empíricos propuestos en la norma NOM-011-Conagua-2015 para la obtención del escurrimiento superficial dan resultados bastante certeros, por lo menos en este ejercicio. Además, el presente escrito muestra una metodología para obtener la disponibilidad en forma conjunta de agua superficial y subterránea, realizando un análisis mediante aproximaciones sucesivas, que permita obtener los coeficientes de infiltración al acuífero por el uso del agua.

**Palabras clave:** Valle de México, recursos hídricos, balance hídrico.

### **Abstract**

With more than 22 million inhabitants, the Basin of the Valley of Mexico is the most populated area in Mexico. Within this region 22% of the gross domestic product is generated. The water needs by its inhabitants reaches a gross volume of  $2\,142 \text{ hm}^3/\text{year}$  and an additional  $641 \text{ hm}^3/\text{year}$  for other uses as agricultural, industrial and other services is required. Of this volume, 62% is withdrawn from aquifers located within the basin, 17% comes from surface water and waste-water, and the remaining 21% is imported from other basins. The basin is currently under high water stress, there is an overexploitation about  $639 \text{ hm}^3/\text{year}$ , which is almost 40% of the gross groundwater withdrawal. In addition the population, although moderate still is growing, at a rate of 0.6% per year. Since it is a closed basin, infrastructure to solve floods

and sewage problems were built starting in the XVII century and continue until our days. Only 15% ( $95 \text{ hm}^3/\text{year}$ ) of the surface runoff is used, the remaining volume of water ( $521 \text{ hm}^3/\text{year}$ ) discharges into the Tula river basin. The total amount of water used in irrigated agriculture, including wastewater, is  $207 \text{ hm}^3/\text{year}$ . This amount of water is used to irrigate approximately 24 000 ha. On the other hand, the wastewater volume at the exit of the basin is  $1\,260 \text{ hm}^3/\text{year}$ . By means of water balance it was estimated a water deficit of  $639 \text{ hm}^3/\text{year}$ . The balance was calculated by successive approximations, in order to obtain the infiltration to the aquifers. The basin is under a huge water stress; therefore it is necessary to implement actions to decrease the water use, it also necessary to improve the water monitoring to be able to evaluate the effectiveness of such actions. The proposed structural actions are to increase aquifers recharge, define systems and recharge zones, to make an efficient use of water and to increase the reuse. Water treatment should be wider implemented and its use should be promoted for gardens and car washing, among others. In order to increase the use of surface water it is necessary to build dams. The most important thing is to reduce the water use in the cities. This will require reconsidering the downstream commitments with the Tula River basin. The empirical methods proposed by the norm NOM-011-Conagua-2015, give very accurate results, at least in this exercise. In addition, the present document shows a methodology to obtain the joint availability of surface and ground water, the analysis is carried out by means of successive approximations to obtain the infiltration coefficients for the water use.

**Keywords:** Valley of Mexico, water resources, water balance.

Recibido: 11/04/2017

Aceptado: 15/07/2018

## Antecedentes



La cuenca del Valle de México es una cuenca cerrada topográficamente, donde tiene asiento la megalópolis de la Ciudad de México. Es la región más poblada del país, con más de 22 millones de personas asentadas en una superficie del orden de 10 000 kilómetros cuadrados, que incluyen a la Ciudad de México en forma total y parcialmente en los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. La cuenca está integrada por un centenar de municipios y delegaciones, y donde se genera 22% del Producto Interno Bruto del país.

Debido al carácter de cuenca cerrada, en el siglo XVII se construyó el primer conducto para dar salida a las aguas del Valle, denominado Túnel de Nochistongo, convirtiéndose en el Tajo debido a los derrumbes que se suscitaron. En 1900 se construyó el Gran Canal del Desagüe, con salida de la cuenca a través del Túnel de Tequisquiac, a fin proteger a la población, unos 550 000 habitantes, contra inundaciones. El continuo crecimiento de la población y sus consecuentes problemas de desalojo de agua hicieron necesaria la construcción del drenaje profundo en 1967, sistema cuya ampliación continúa hasta nuestros días con el Túnel Emisor Oriente.

Respecto al abastecimiento de agua y ante el crecimiento de la población, surgió la necesidad de realizar una serie de perforaciones de pozos en las décadas de 1950 y 1960, iniciando así la sobreexplotación de los acuíferos.

Además, se importa agua de otras cuencas (transvases), entre las que se cuenta la proveniente del Valle de Lerma, que inició su operación en 1951, con un caudal de  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , mismo que proviene de pozos ubicados en aquel Valle. El caudal incrementó con el tiempo, de tal manera que en 1974 se llegaron a importar cerca de  $13.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Después de ese año, el caudal bajó de forma paulatina hasta llegar en 1990 a valores cercanos a  $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $123 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), volumen que se mantiene prácticamente constante hasta la actualidad.

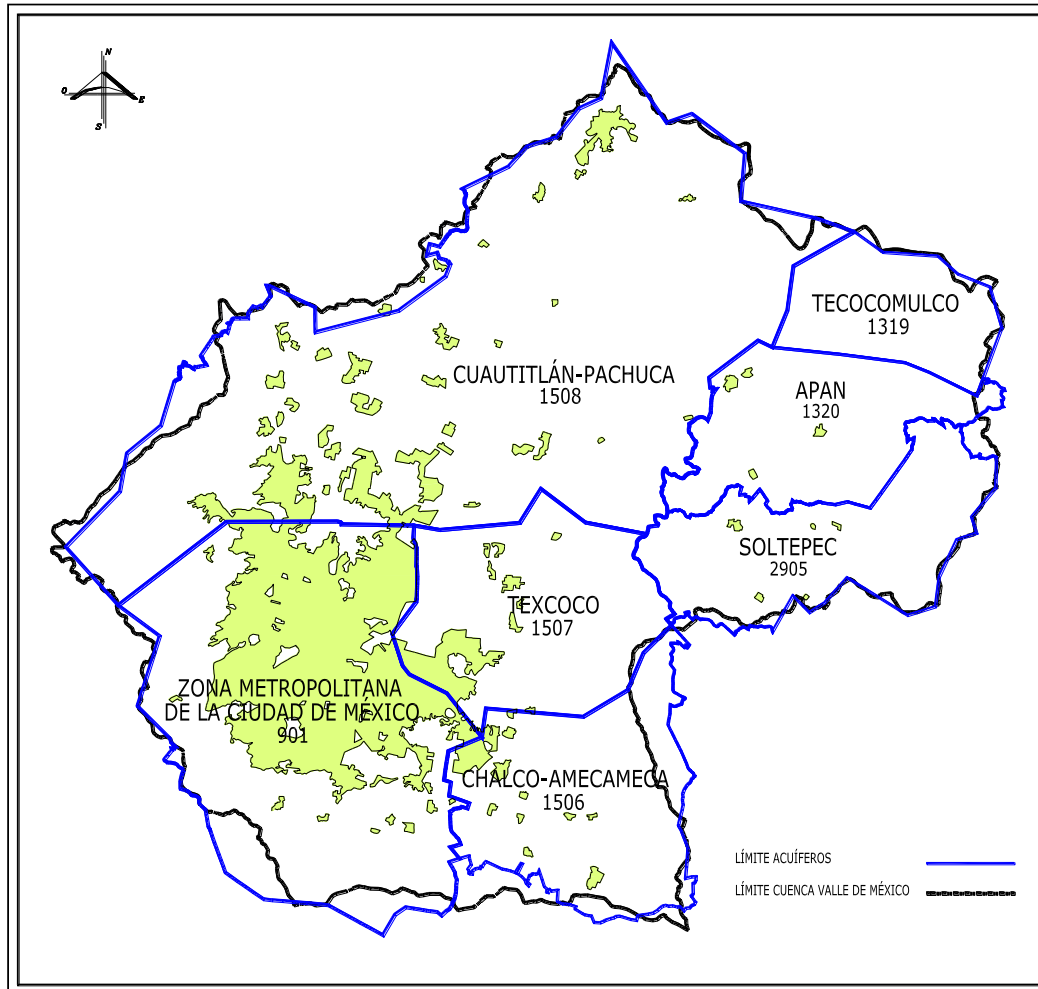
Otra fuente externa es el llamado Sistema Cutzamala, que inició su operación en 1982, con un caudal de  $126 \text{ hm}^3/\text{año}$ , incrementado en 1994 a unos  $462 \text{ hm}^3/\text{año}$ , aportación proveniente de una serie de presas, esto es, de agua superficial.

## Aspectos administrativos

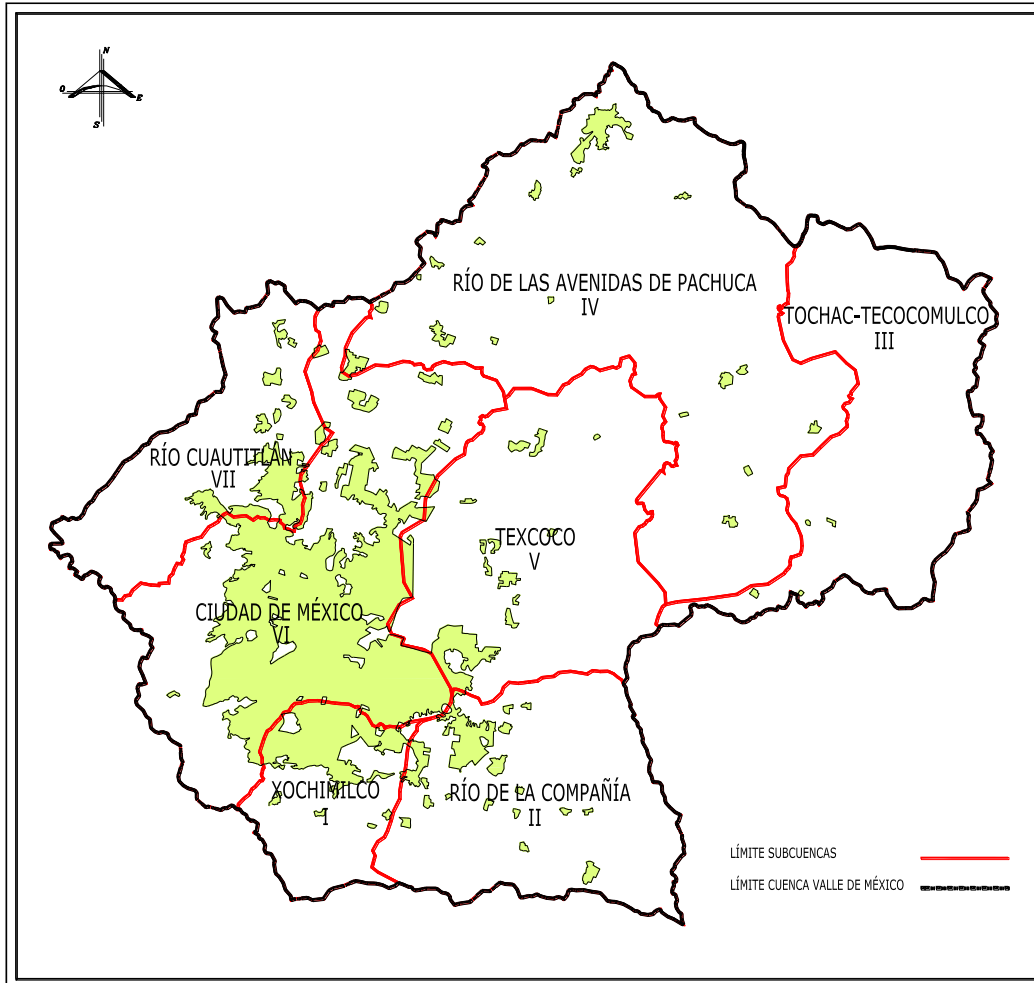
Para administrar los recursos hídricos, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) divide la cuenca del Valle de México en siete zonas para las aguas superficiales y otras siete para las aguas subterráneas (Tabla 1), cuyas sumas parciales en ambos casos son sensiblemente las mismas y cuya división geográfica se muestra en la Figura 1 y Figura 2. La población de esta megalópolis se concentra en las zonas administrativas de agua subterránea denominadas Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y la llamada Zona Metropolitana de la Ciudad de México, donde habita 99% de las personas asentadas en la cuenca del Valle de México (Conapo, 2015).

**Tabla 1.** Zonas administrativas en materia de recursos hídricos.

Clave acuífero	Nombre del acuífero	Área (km <sup>2</sup> )	Sub-Cuenca hidrológica	Nombre de la cuenca	Área (km <sup>2</sup> )
<b>Aguas subterráneas</b>			<b>Aguas superficiales</b>		
901	Zona Metropolitana de la Ciudad de México	1,900	I	Xochimilco	508
1319	Tecocomulco	564	II	Río La Compañía	1,167
1320	Apan	733	III	Tochac-Tecocomulco	1,328
1506	Chalco-Amecameca	1,393	IV	Río de las Avenidas de Pachuca	2,647
1507	Texcoco	934	V	Texcoco	1,399
1508	Cuautitlán-Pachuca	3,870	VI	Ciudad de México	1,816
2902	Soltepec	429	VII	Río Cuautitlán	832
<b>Suma Cuenca del Valle de México</b>		<b>9,823</b>	<b>Suma Cuenca del Valle de México</b>		<b>9,698</b>



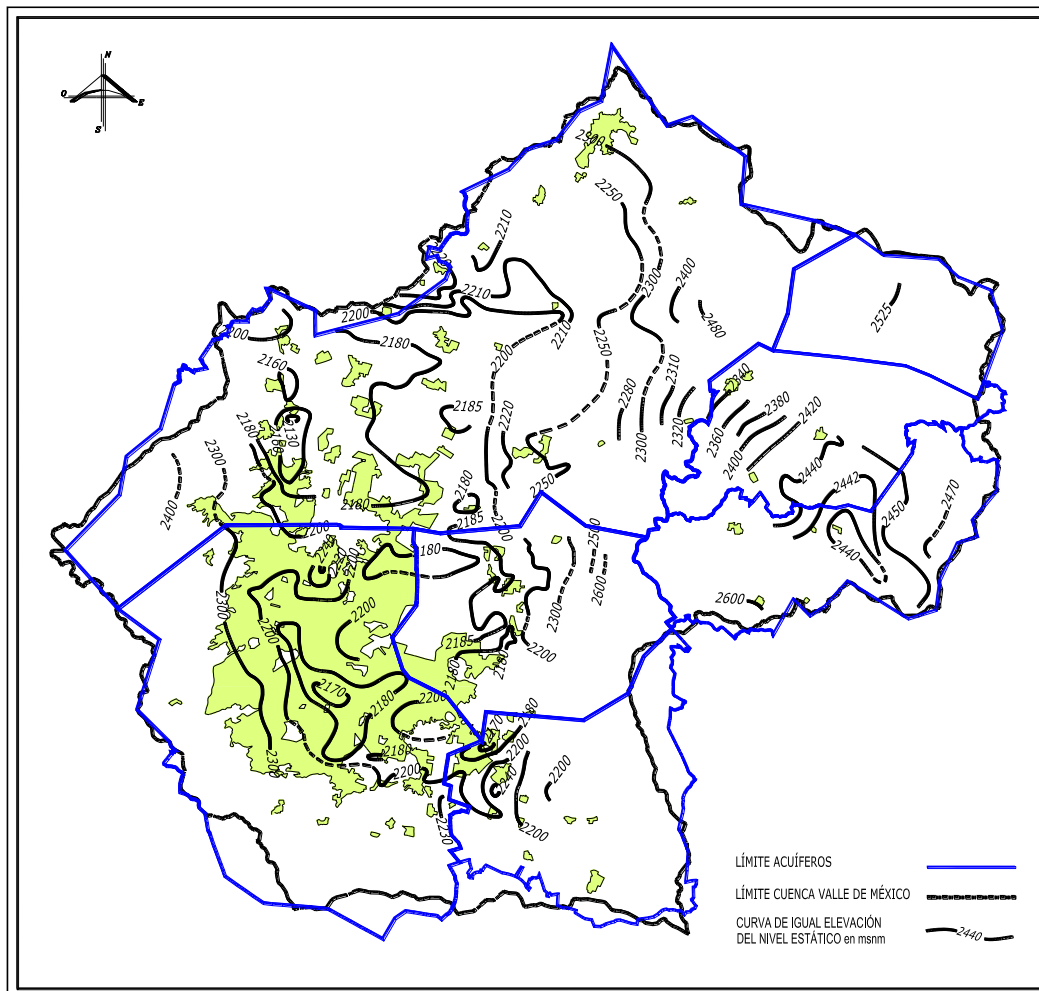
**Figura 1.** Zonas administrativas en materia de aguas del subsuelo (acuíferos).



**Figura 2.** Zonas administrativas en materia de aguas superficiales (cuencas).

En este punto conviene recordar que acuífero se define como “cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo” (Ley de Aguas Nacionales, 1992). Lo anterior significa que no necesariamente toda el área administrativa es propiamente acuífero, pues incluyen a las áreas de recarga y en algunas ocasiones sus límites coinciden con divisiones políticas.

Independientemente de la definición de los límites convencionales, las áreas administrativas de aguas subterráneas en que está dividida la Cuenca del Valle de México, son prácticamente independientes entre sí, sólo flujos incipientes entre el acuífero de Cuautitlán-Pachuca comunican con los de Apan y Soltepec, por lo menos así lo demuestra la red de flujo subterráneo obtenida de pozos con una profundidad entre los 100 a 300 m, según se puede ver en la figura 3 (Conagua-Ocavm, 2007).



**Figura 3.** Red de flujo subterráneo en la Cuenca del Valle de México.

Por lo que respecta a la división administrativa de las sub-cuencas de aguas superficiales, es sin lugar a dudas las denominadas de la Ciudad de México, Xochimilco y Río Cuautitlán, donde se concentra la mayor población y las actividades económicas de esta gran región (Conagua-Ocavm, 2010a; Conagua-Ocavm, 2010b).

Adicionalmente y según la Ley de Aguas Nacionales de 1992, "Cuenca Hidrológica, es la unidad del territorio,... normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas -aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad,... La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos" (Ley de Aguas Nacionales, 1992). Por lo que esta división de cuencas obedece en principio a los parteaguas topográficos superficiales, aunque en algunos casos existe comunicación entre sí, en especial en el Valle de México, debido a la construcción de obras de drenaje que han modificado esta independencia, por lo que desde el punto de vista hidrológico hay que tomar en cuenta estas transferencias al realizar balances hídricos por sub-cuenca.

Para obviar esta situación, en este escrito se hace el análisis del agua superficial para toda la Cuenca del Valle de México y en el caso de las aguas subterráneas, el análisis se hizo por área administrativa, de acuerdo con los estudios realizados por la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (Conagua-Ocavm, 2007).

## **Usos del agua**

### **Agua subterránea**

Los censos de aprovechamientos de aguas subterráneas realizados por la Conagua-Ocavm reportan una extracción bruta de agua subterránea

de unos 1,736 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales el 87% corresponde al uso público urbano y sólo el 13% se integra por los demás usos agrícola, industrial y servicios (Tabla 2) (DOF, 2015a). Este volumen se utilizan en el riego de unas 17,783 ha y para el abasto de una población de unos 22 millones de habitantes, como uso público urbano, mismo que considera servicios, comercial, industria, fugas en la red de distribución y en general, para cubrir todas las necesidades de la población.

**Tabla 2.** Volúmenes brutos usados de agua subterránea (hm<sup>3</sup>/año).

	Agrícola	Público Urbano	Industrial	Otros	Suma
ZMCM	1	559	64	1	625
Cuautitlán-Pachuca	45	687	16	4	752
Texcoco	47	130	4	2	183
Chalco-Amecameca	16	108	4	1	129
Apan	1	12	0	2	15
Tecocomulco	0	12	1	0	13
Soltepec	13	5	1	0	19
<b>Total</b>	<b>123</b>	<b>1,513</b>	<b>90</b>	<b>10</b>	<b>1,736</b>

## Agua superficial

Es complicado estimar los volúmenes usados de agua superficial, debido a que los escurrimientos resultan de una mezcla entre agua residual y los propios superficiales. Según las estadísticas de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sagarpa), la superficie bajo riego en la región alcanza las 41,665 ha, que destinan en un 81% a cultivos anuales y el restante 19% a cultivos perennes, (cuadro 3). Superficie obtenida para el Distrito Federal y los 70 municipios que cuentan con riego, del total de 128 municipios y delegaciones integrados en la cuenca, misma que es regada por agua superficial y subterránea,

aspecto que no se especifica en estas estadísticas (Sagarpa-Siacon, 2015).

**Tabla 3.** Superficie bajo riego en la Cuenca del Valle de México.

Acuífero	Anual (ha)	Perenne (ha)
Chalaco Amecameca	1 064	141
Texcococo	5 070	765
ZMCM	2 464	29
Cuautitlán-Pachuca	23 463	6776
Apan	296	67
Tecocomulco	53	16
Soltepec	1 377	84
<b>Suma Cuenca del Valle de México</b>	<b>33 787</b>	<b>7 878</b>

Por otro lado, el uso de agua superficial obtenido de la programación de riegos del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, que toma en cuenta estadísticas históricas y por lo tanto, se puede suponer que los valores del cuadro 4 muestran el volumen usado en la agricultura en un periodo amplio (Conagua-Ocavm, 2010a; Conagua-Ocavm, 2010b). De esta forma, el agua superficial usada es del orden de 207 hm<sup>3</sup>/año, para el riego de 23 882 ha, según el informe mencionado, de este valor sólo 64 hm<sup>3</sup>/año provienen de aguas blancas y los restantes 143 hm<sup>3</sup>/año de aguas residuales.

Como la superficie total es de 41 665 ha reportada por SIACON y según lo anterior, 23 882 ha son irrigadas por aguas de origen superficial, por lo tanto, las restantes 17 783 ha son irrigadas con agua subterránea. De esta manera resulta una lámina bruta de 0.87 m para el agua superficial y de 0.69 m para el agua subterránea (Tabla 4).

**Tabla 4.** Aprovechamiento de agua superficial para riego en la Cuenca del Valle de México.

Programación 2011-2012			
	Superficie ha	miles m <sup>3</sup>	Lámina m



Presa Iturbide				
UR Tlazala	382	1,529	0.40	Aguas blancas
UR Transfiguración	112	673	0.60	Aguas blancas
Presa El Manantial	115	781	0.68	Aguas blancas
Presa Guadalupe				
UR Coyotepec	360	1,950	0.54	Aguas blancas
UR Teoloyucan	1,670	15,853	0.95	Aguas blancas
UR Cuautitlán	4,245	36,278	0.85	Aguas blancas
Presa La Concepción				
DR 073 La Concepción	343	3,565	1.04	Aguas blancas
U de R Tepotzotlán	952	2,952	0.31	Aguas blancas
Laguna de Zumpango				
UR Dique 3 al 7	246	1,334	0.54	Aguas grises
UR Ass Usuarios	695	7,194	1.04	Aguas grises
Apoyo al sistema		7,750		Aguas grises
Gran Canal del Desagüe				
DR 88 Chiconautla	2,162	25,438	1.18	Aguas residuales
Antes de los túneles				
DR 074 Zumpango	8,965	72,478	0.81	Aguas residuales
Río Cuautitlán				
Unidades de riego	3,635	29,603	0.81	Aguas residuales
	8,179	63,581	0.78	Aguas blancas
	941	16,278	1.73	Aguas grises
	14,762	127,519	0.86	Aguas residuales
Total agua superficial	23,882	207,378	0.87	
Aguas superficiales	23,882	207,378	0.87	
Aguas subterráneas	17,783	122,427	0.69	
Total superficie irrigada	41,665	329,805		

## **Recarga natural**

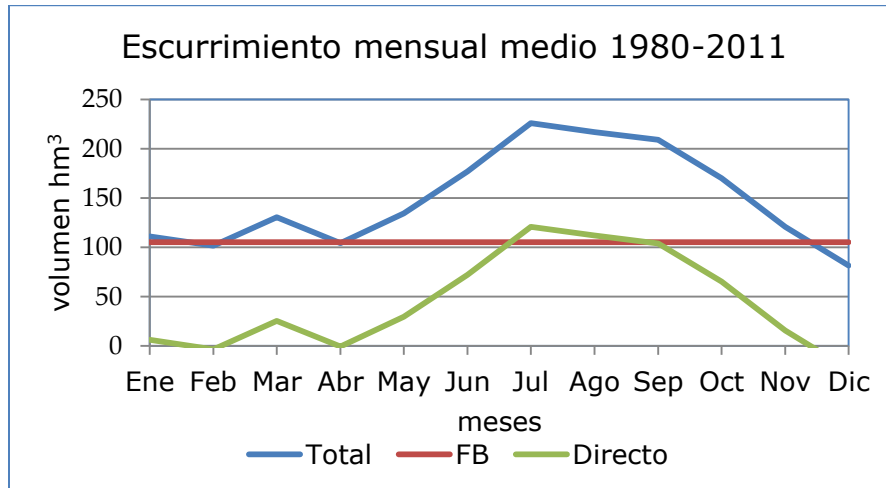
### **Escorrentamiento superficial por cuenca propia**

De la precipitación, una parte escurre superficialmente (escorrentamiento directo), otra parte se infiltra, recargando a los acuíferos y el volumen restante se evapora. Para obtener el escorrentamiento directo se analizaron los volúmenes aforados a la salida de la cuenca, mismos que se miden en las estaciones hidrométricas 26030 El Salto, 26216 Túnel Nuevo de Tequixquiac, 26007 Tajo de Tequixquiac, 26500 Emisor Requena y 26437 Conejos, cuya localización se muestra en la figura 4. De los datos de estas estaciones resulta un volumen total anual de 1,781 hm<sup>3</sup>/año, como promedio en el periodo 1980-2011, valores que se muestran en la cuadro 5 (Conagua, 2015).



**Figura 4.** Sistema de drenaje a la salida de la Cuenca del Valle de México.

Al separar el escurrimiento total aforado ( $1,781 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), en flujo directo ( $521 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) y flujo base ( $1,260 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), como un promedio en el periodo mencionado. La componente de flujo base, así calculada, se refiere al de origen subterráneo más los retornos por el drenaje debidos al uso del agua, tanto de origen superficial como subterráneo.



**Figura 5.** Escorrimentos directo y total a la salida de la cuenca.

**Tabla 5.** Volumen aforado a la salida de la Cuenca del Valle de México.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Escorrimento Total	111	101	130	104	134	177	226	217	209	170	121	81	1,781
Flujo en estiaje	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	1,260
Escorrimento Directo	6	-4	25	-1	29	72	121	112	104	65	16	-24	521

Según el cuadro anterior, el volumen aforado a la salida de la cuenca, por flujo directo medido en las estaciones hidrométricas, resulta de 521 hm<sup>3</sup>/año. Al sumar a este volumen la evaporación en la laguna de Tecocomulco, donde sólo se ha tomado el 50% de la evaporación calculada en 2010, al considerar que la otra mitad proviene de agua subterránea, más el volumen usado en la Presa Madín para uso público urbano y el uso agrícola en otras presas, da como resultado un valor de 616 hm<sup>3</sup>/año, valor muy cercano al obtenido, mediante métodos empíricos en el estudio de disponibilidad (682 hm<sup>3</sup>/año), como se ve en los cuadros 6 y 7 (Conagua-Ocavm, 2010a; Conagua-Ocavm, 2010b).

**Tabla 6.** Resultados del balance de aguas superficiales en la Cuenca del Valle de México.

Salida de escurrimiento directo medido en estaciones hidrométricas	521
--	-----

Evaporación en laguna de Tecocomulco	19
Presa Madín aprovechamiento	12
Uso agrícola superficial agua blanca	64
<b>Escurrimiento por cuenca propia (hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>616</b>

Lo anterior significa que del volumen superficial que se genera en la Cuenca del Valle de México (616 hm<sup>3</sup>/año), sólo se aprovecha el 15% dentro de la misma cuenca (95 hm<sup>3</sup>/año), quedando un sobrante de escurrimiento directo que descarga hacia la Cuenca del Río Tula de 521 hm<sup>3</sup>/año.

De acuerdo con los estudios realizados por la Conagua, el escurrimiento por cuenca propia en la Cuenca del Valle de México que se muestra en el siguiente cuadro 7, se obtuvo mediante métodos empíricos y para cada una de las sub-cuencas administrativas en que se divide la Cuenca del Valle de México, valores que se encuentran publicados en el Diario Oficial de la Federación el 8 de julio de 2011 y el 8 de marzo de 2016 (DOF, 2011; DOF, 2016). En este caso, el volumen de escurrimiento se calculó mediante los métodos empíricos sugeridos en la NOM-01-Conagua-2015 (DOF, 2015b):

$$\text{Volumen anual de escurrimiento natural en la cuenca} = (\text{precipitación anual en la cuenca}) * (\text{área de la cuenca}) * (\text{Coeficiente de escurrimiento})(1)$$

En la expresión anterior el coeficiente de escurrimiento es función del tipo y uso de suelo.

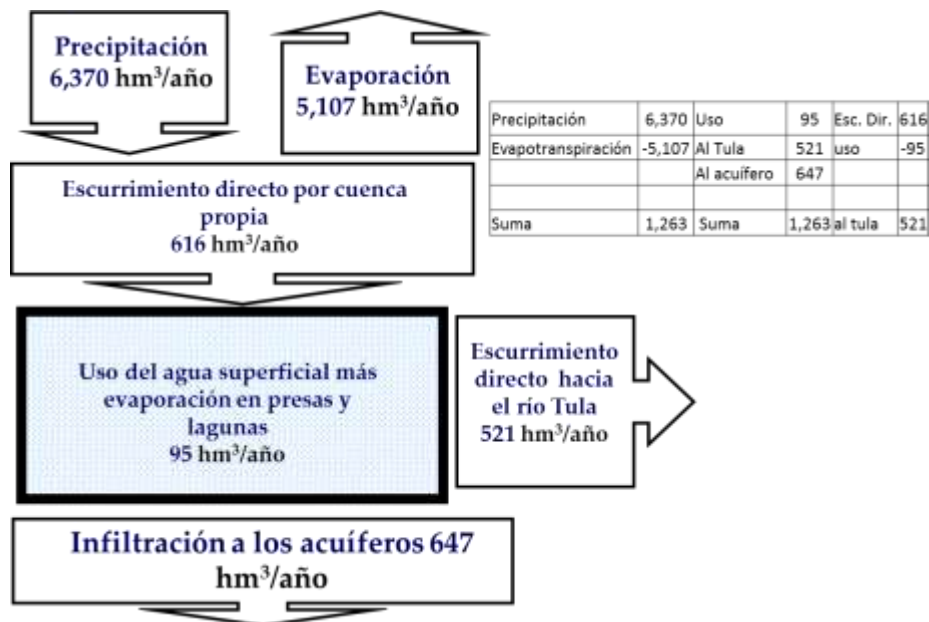
Los valores obtenidos con ambas metodologías, coinciden sensiblemente, para el caso de las medidas directas a la salida de la cuenca (616 hm<sup>3</sup>/año, cuadro 6) y por métodos empíricos (682 hm<sup>3</sup>/año, cuadro 7), resultando una diferencia de 11%.

**Tabla 7.** Resultados del cálculo del escurrimiento superficial por métodos indirectos (Conagua-OCAVM, 2010a; Conagua-OCAVM, 2010b).

Cuenca hidrológica	Área km <sup>2</sup>	K	Precipitación anual mm	Coeficiente de escurrimiento	hm <sup>3</sup> /año
--------------------	----------------------	---	------------------------	------------------------------	----------------------

I	Xochimilco	508	0.249	707	0.1231	45
II	Río La compañía	1,167	0.223	681	0.0969	78
III	Tochac-Tecocomulco	1,328	0.219	644	0.0890	77
IV	Río de las Avenidas de Pachuca	2,647	0.228	542	0.0851	124
V	Texcoco	1,399	0.241	580	0.1003	82
VI	Ciudad de México	1,816	0.270	729	0.1440	192
VII	Río Cuautitlán	833	0.241	790	0.1257	84
<b>Cuenca del Valle de México</b>		<b>9,698</b>	<b>0.238</b>	<b>643</b>		<b>682</b>

Con base en lo anterior es posible realizar un balance de aguas superficiales mismo que se muestra en la figura 6.



**Figura 6.** Balance hídrico de aguas superficiales.

El resultado del balance indica que la precipitación menos la evaporación (1,263 hm<sup>3</sup>/año) constituye el escurrimiento directo (616 hm<sup>3</sup>/año) más la infiltración o recarga natural a los acuíferos (647 hm<sup>3</sup>/año), valor este último, que se obtiene más adelante.

## Recarga natural a los acuíferos

Por lo que respecta a la recarga natural a los acuífero, concepto equivalente al escurrimiento por cuenca propia en las aguas superficiales, su cálculo se realizó aplicando la misma metodología de la misma norma para obtener el escurrimiento directo. Agregando el concepto de evapotranspiración (ET) obtenida mediante la fórmula empírica propuesta por Turc, fórmula que está en función de la precipitación (P) y la temperatura (T), y cuya diferencia con el escurrimiento superficial y la precipitación, es la infiltración o la recarga natural a los acuíferos (Réménieras, 1960).

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + (P/L)^2}} \quad (2)$$

Donde  $L$  se obtiene mediante:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (3)$$

$$\text{Volumen de infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Evaporación} - \text{Eskurrimiento} \quad (4)$$

En este caso, se calculó la infiltración natural en el área total administrativa de cada acuífero, posteriormente se obtuvo un coeficiente de infiltración (*la infiltración entre la precipitación*), coeficiente que se aplica sólo a las zonas altas o de recarga, y posteriormente, en la zona donde se tienen datos de piezometría se calcularon las entradas horizontales con la fórmula de Darcy, de esta forma se tienen dos

valores que conforman la recarga natural, en zonas altas e infiltración en la zona de valle, tal como se muestra en el cuadro 8.

La ley de Darcy muestra que la velocidad del flujo ( $v$ ) es directamente proporcional al desnivel ( $\Delta h$ ) e inversamente proporcional a la distancia ( $L$ ) en que ocurre ese cambio:

$$v = k \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

donde  $k$  es la conductividad hidráulica.

**Tabla 8.** Resultados del cálculo de la recarga natural a los acuíferos.

Concepto	Unidades	ZMCM	Cuautitlán-Pachuca	Texcoco	Chalco-Amecameca	Apan	Tecocomulco	Soltepec	Total V. M.
Área total	km <sup>2</sup>	1,900	3,870	934	1,393	733	564	429	9,823
Área de valle	km <sup>2</sup>	970	1,800	600	300	285	417	180	
Coefficiente	$I_1$	0.0222	0.0854	0.1000	0.1140	0.0641	0.1000	0.1000	
Precipitación	mm/año	675	643	575	700	597	620	700	
Infiltración en zonas altas	hm <sup>3</sup> /año	15	99	35	24	11	26	13	223
Entradas horizontales al valle	hm <sup>3</sup> /año	137	116	65	18	17	3	68	424
<b>Recarga natural</b>	<b>hm<sup>3</sup>/año</b>	<b>152</b>	<b>215</b>	<b>100</b>	<b>42</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>81</b>	<b>647</b>

Finalmente, la recarga natural como escurrimiento directo en los ríos (616 hm<sup>3</sup>/año, cuadro 6) y como recarga a los acuíferos (647 hm<sup>3</sup>/año, cuadro 8), resulta en total de unos 1,263 hm<sup>3</sup>/año, tal como ya se mencionó (figura 6).

## Balances hídricos en la cuenca del Valle de México



El balance de aguas subterráneas resulta complejo, ya que el acuífero recibe una recarga natural y una inducida por el uso del agua superficial, subterránea y residual. Como valores iniciales, se tiene que la recarga natural a los acuíferos es de 647 hm<sup>3</sup>/año, la extracción bruta de aguas subterráneas es de 1,736 hm<sup>3</sup>/año, quedando un flujo base o de drenaje hacia el río Tula de 1,260 hm<sup>3</sup>/año. El balance se realizó con el “método de los coeficientes” por aproximaciones sucesivas, verificando el rendimiento específico de los acuíferos y comparando con algunos datos publicados (Peña, 2014; DOF, 2015a).

Por otra parte, para los principales acuíferos que integran la cuenca, los balances resultan negativos: ZMCM (-147 hm<sup>3</sup>/año), Cuautitlán-Pachuca (-379 hm<sup>3</sup>/año), Texcoco (-47 hm<sup>3</sup>/año) y Chalco-Amecameca (-66 hm<sup>3</sup>/año). Los tres acuíferos restantes (Apan, Tecocomulco y Soltepec) están en equilibrio y en conjunto representan el 20% del área total de la Cuenca del Valle de México, con una población de tan sólo 250,000 habitantes.

La recarga inducida se calculó considerando un 20% por el uso público urbano y 25% por el uso agrícola, resultando una infiltración inducida al acuífero de 566 hm<sup>3</sup>/año.

Finalmente, el resultado del balance de aguas subterráneas arroja un valor de 639 hm<sup>3</sup>/año como minado del acuífero (cuadro 9 y figura 7), valor que dividido entre el volumen drenado, muestra el 0.13 como coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico de los acuíferos, cifra que es acorde con los materiales que se presentan en el subsuelo. Los abatimientos anuales promedio en el periodo 2002-2007 se muestran en la Figura 8.

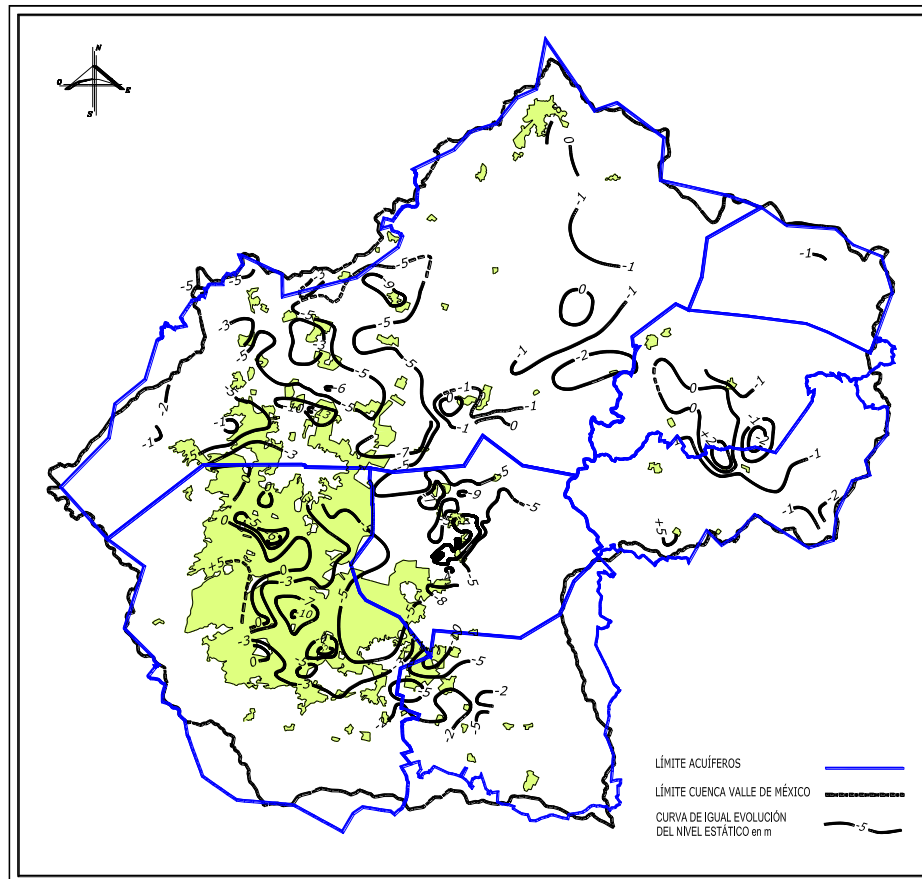
**Tabla 9.** Balance de agua subterránea (hm<sup>3</sup>/año).

	ZMCM	Cuautitlán-Pachuca	Texcoco	Chalco-Amecameca	Apan	Tecocomulco	Soltepec	Total V de M
Recarga natural	152	215	100	42	28	29	81	647
Recarga inducida	326	158	46	27	3	2	4	566

<b>Recarga total</b>	<b>478</b>	<b>373</b>	<b>146</b>	<b>69</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>85</b>	<b>1,213</b>
Extracción bruta	625	752	183	129	15	13	19	<b>1,736</b>
Manantiales			10	3				13
Evaporación						18		18
Flujo subterráneo				3	16		66	85
<b>Descarga total</b>	<b>625</b>	<b>752</b>	<b>193</b>	<b>135</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>85</b>	<b>1,852</b>
<b>Minado</b>	<b>-147</b>	<b>-379</b>	<b>-47</b>	<b>-66</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-639</b>



**Figura 7.** Balance hídrico de aguas subterráneas.



**Figura 8.** Abatimientos del nivel estático observado en la Cuenca del Valle de México.

De acuerdo con la multicitada norma donde se anota que el retorno al drenaje del uso agrícola es del orden del 80%, el uso público urbano de 75% y el industrial 55%. En el cuadro 9 se muestra el balance hídrico, donde el coeficiente aplicado al uso público urbano fue del 51%, valor ajustado para lograr la descarga medida a la salida de la cuenca de 1,260 hm<sup>3</sup>/año. Bajo esta premisa, los coeficientes son cercanos a los recomendados por la norma, los demás coeficientes no fueron modificados (DOF, 2015c).

Procediendo de esta forma, del volumen bruto de agua usada, es de 2,783 hm<sup>3</sup>/año, el retorno al drenaje, resulta de 1,260 hm<sup>3</sup>/año, la infiltración a los acuíferos de 567 hm<sup>3</sup>/año, por lo que el consumo neto, resulta de 956 hm<sup>3</sup>/año, este último valor representa el 34% del total del agua usada (Tabla 9).

Cabe aclarar que la descarga al río Tula en época de estiaje es producto de sobrantes del uso del agua exclusivamente (drenaje), debido a que los niveles estáticos del agua subterránea son bastante profundos como para existir una descarga significativa de las aguas subterráneas a los ríos o drenes (flujo base).

**Tabla 9.** Resultados del balance hídrico en la Cuenca del Valle de México.

Fuente/uso	Volumen usado hm <sup>3</sup> /año	Al drenaje		Al subsuelo		Drenaje + infiltra hm <sup>3</sup> /año	Consumo hm <sup>3</sup> /año
		Coeficiente	Volumen hm <sup>3</sup> /año	Coeficiente	Volumen hm <sup>3</sup> /año		
Lerma	123	0.51	63	0.20	25	88	35
Cutzamala	462	0.51	237	0.20	92	330	132
Manantiales DF	26	0.51	13	0.20	5	18	7
Madín (Gestión hídrica 2010)	12	0.51	6	0.20	2	9	4
Magdalena PU	6	0.51	3	0.20	1	5	2
Agua subterránea	1,513	0.51	777	0.20	303	1,080	433
Suma uso público urbano	2,142		1,101		428	1,529	613
Uso de aguas residuales agrícola plantas tratamiento	214	0.20	43	0.25	54	96	118
Uso de aguas superficiales agrícola (superficial blancas, residuales)	207	0.20	41	0.25	52	93	114
Otros	9	0.20	2	0.25	2	4	5
Agua subterránea	122	0.20	24	0.25	31	55	67
Suma agrícola	553		111		138	249	304
Industrial							
Industrial	88	0.55	49			49	40
Uso industrial	88		49		0	49	40
Suma industrial	88		49		0	49	40
Total por el uso de agua	2,783		1,260		567	1,827	957

El procedimiento utilizado en este análisis consistió en hacer variaciones paramétricas a los coeficientes utilizados, tanto en el balance del acuífero, como de los escurrimientos superficiales, es decir, el análisis es por aproximaciones sucesivas (Arcos-Hernández, 2000).

## Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el balance hídrico mostrado se desprende que del agua superficial generada en la cuenca (616 hm<sup>3</sup>/año) sólo se aprovecha el 15% dentro de la cuenca (95 hm<sup>3</sup>/año), quedando un sobrante de escurrimiento directo que se va hacia la Cuenca del Río Tula de 521 hm<sup>3</sup>/año, como lo muestran las mediciones realizadas en la estaciones hidrométricas a la salida de la cuenca.

	Volumen hm <sup>3</sup> /año	
Superficial	521	Excedente
Subterránea	-639	Déficit
Residual	1,260	Excedente

Aunque es difícil retener esa agua, es deseable hacer uso de ella dentro de la propia Cuenca del Valle de México, para la recarga de acuíferos o su aprovechamiento, ya que se supone que no están contaminadas. Aunque se requerirían obras para retener esas aguas broncas. Un programa semejante al realizado en el periodo de 1940-1950, con la construcción de una serie de presas en el poniente del Valle, mismas que han sido abandonadas por el crecimiento de la mancha urbana.

El agua que transita por el drenaje, prácticamente con régimen uniforme, alcanza un valor de 1,260 hm<sup>3</sup>/año, que también escurre hacia la Cuenca del Río Tula. Lo anterior significa que si el minado del acuífero estimado en 639 hm<sup>3</sup>/año y si se implementa una política de

reúso dentro de la cuenca, con su debido tratamiento, es posible disminuir sensiblemente la sobreexplotación de los acuíferos.

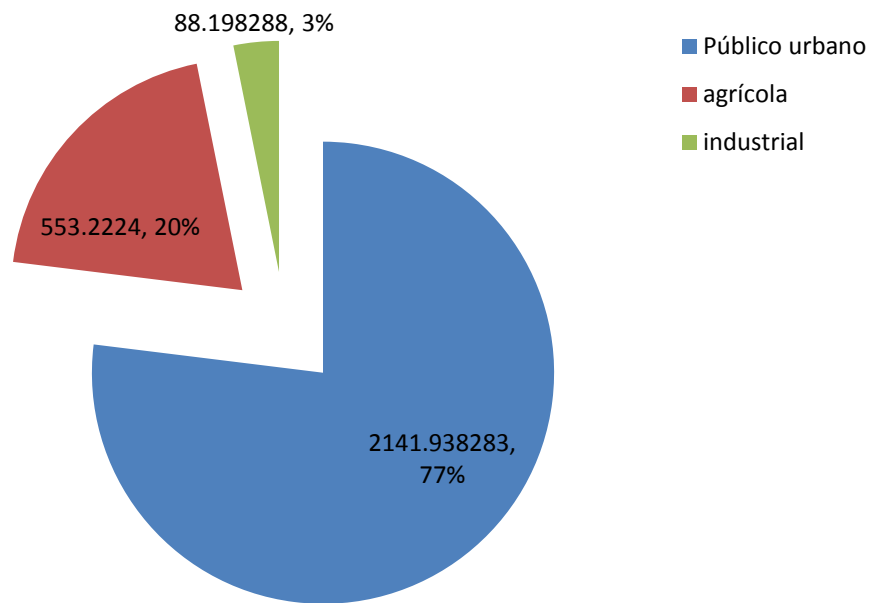
Por lo que es necesario implementar un programa intensivo para el reúso del agua, donde el principal usuario sería los propios organismos encargados del abasto a las poblaciones, en el riego de jardines o el uso en establecimientos como los de lavado de vehículos y aún en los usos residenciales. En ambos casos, en esta conclusión y la anterior, será necesario revisar los compromisos aguas abajo y su reprogramación.

El volumen bruto total de agua usada en la Cuenca del Valle de México es de 2,783 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 1,736 hm<sup>3</sup>/año provienen de los acuíferos (62%), 462 hm<sup>3</sup>/año del agua superficial (17%), que incluyen el uso de aguas residuales y los restantes 585 hm<sup>3</sup>/año de importaciones de otras cuencas (21%).

De este volumen de 2,783 hm<sup>3</sup>/año, el 77% (2,142 hm<sup>3</sup>/año) se utiliza en los centros urbanos constituyendo el uso público urbano, agrícola 553 hm<sup>3</sup>/año (20%) y los restantes 88 hm<sup>3</sup>/año (3%) se destina a los demás usos (figuras 9 y 10).

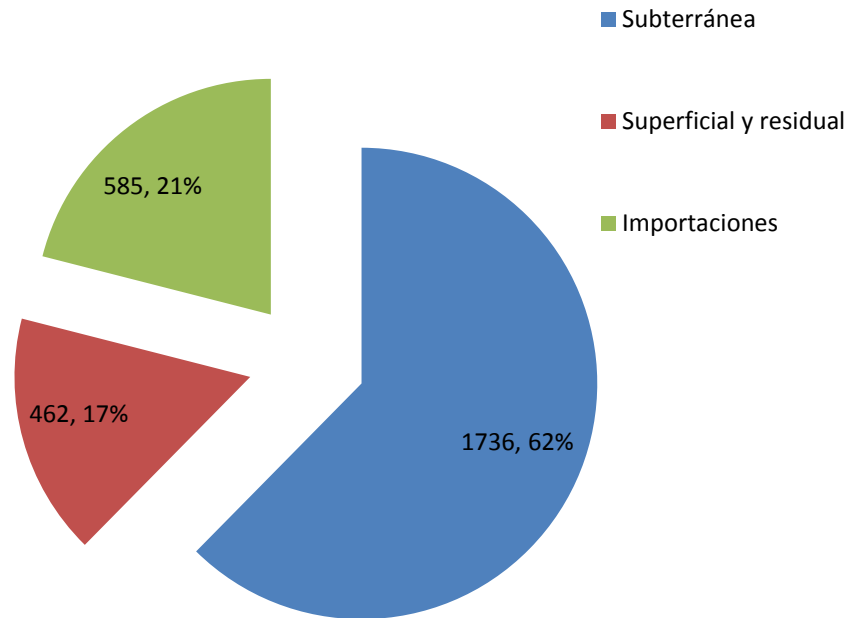


## Usos del agua



**Figura 9.** Usos de los recursos hídricos en la Cuenca del Valle de México.

## Origen del agua



**Figura 10.** Origen de los recursos hídricos en la Cuenca del Valle de México.

Ante esta situación, es necesario realizar acciones encaminadas hacia la disminución del uso público urbano, sin olvidar el uso agrícola, en donde hay que tener cuidado con la venta de derechos cuando los usuarios tengan ahorros.

Visitas recientes a los pozos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (2010) indican que sólo 13% cuenta con medición, lo que significa que no se tiene la certeza del volumen usado. Por otro lado, en la micromedición existe también una deficiencia importante, de por lo menos un millón de tomas domiciliarias, pues sólo un 65% cuenta con medidor.

Por lo tanto, la medición es una tarea urgente para evaluar las acciones que se implementen o realicen sobre los usos del agua, verificando la eficacia de dichas acciones.



Una de las acciones propuestas más comunes para disminuir el uso del agua en el sector público urbano, se refiere a la disminución de las fugas en la red.

Acción que indudablemente disminuirá la dotación en el sector público urbano, acción que es necesario tomar en cuenta en los balances ya que al mismo tiempo disminuye la recarga inducida al acuífero.

En los balances realizados se han supuesto una serie de coeficientes, lo que hace necesario llegar a cifras más precisas.

Por lo tanto es necesario implementar un sistema de mediciones del escurrimiento del agua y el uso real tanto superficial, subterráneo y residual. En las estaciones hidrométricas instalar sistemas más efectivos que actualmente ya están desarrollados por varias empresas en el mundo (<http://www.photrack.ch>)

Ante lo expuesto, será posible medir las acciones estructurales, contenidas en la mayoría de los Planes de Manejo, realizados por la Dirección Técnica de la Conagua, para lograr la sustentabilidad del agua, donde figuran tres ejes principales: Recarga de acuíferos, uso eficiente del agua y el reúso del agua y de un análisis costo-eficacia.

Por último, es importante mencionar que los métodos empíricos propuestos por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-Conagua-2015 dan resultados bastante certeros, por lo menos en el ejercicio realizado en este caso. Además, el presente escrito muestra una metodología que obtiene la disponibilidad en forma conjunta, de agua superficial y subterránea, que incluye la obtención de los coeficientes de infiltración por aproximaciones sucesivas para la obtención de la infiltración a los acuíferos por el uso del agua.

## Referencias

- Arcos-Hernández, D. J. (2000). *Actualización de los coeficientes para obtener la recarga en los acuíferos del Valle de México* (tesis de maestría). México, DF, México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2013). *Edición 2012. Situación del Subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). *Banco Nacional de Datos de Agua Superficial*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx>

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2007). *Apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad de los acuíferos ZMCM, Texcoco, Chalco-Amecameca, y Cuautitlán-Pachuca, para su publicación*. D.F., México: Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2010a). *Revisión de la disponibilidad de aguas superficiales en las Cuencas del Valle de México y Tula*. D.F., México: Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2010b). *Programación de riegos en el Valle de México*. D.F., México: Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2016). *Resumen del estado de los pozos visitados del Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. D.F., México: Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, Dirección de Administración del Agua.

Conapo, Consejo Nacional de Población. (2015). *Proyecciones de población 2010-2030, a nivel municipal*. Recuperado de <http://www.conapo.gob.mx/>

DOF, Diario Oficial de la Federación. (8 de julio, 2011). *Tercera Sección. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Xochimilco, Río la Compañía, Tochac-Tecocomulco, Río de las avenidas de Pachuca, Texcoco, Ciudad de México, Río Cuautitlán, Presa Requena, Presa Endhó, Río Salado, Río Actopan, Río Alfajayucan, Río Tula, mismas que forman parte de la Subregión Hidrológica Valle de México y Río Tula de la Región Hidrológica número 26 Pánuco*. México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (20 de abril, 2015a). *Segunda sección. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad de agua*

- subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones administrativas que se indican.* México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (20 de abril, 2015b). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-Conagua-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.* México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (20 de abril, 2015c). *Documento de apoyo para el cálculo de la actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea.* México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (8 de marzo, 2016). *Segunda Sección. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales nacionales de las 731 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos.*
- Ley de Aguas Nacionales de 1992, *Diario Oficial de la Federación* (24/03/2016). Recuperado de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16\\_240316.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf)
- Peña, S. (2014). *Introducción a la hidrología subterránea* (pp. 170-176). D.F., México: Proyectos, Estudios y Sistemas, S.A. de C.V.
- Réménieras, G. (1960). *L'Hydrologie de L'Ingénieur* (225 pp.). Paris, France: Collection Du Laboratoire National D'Hydraulique.
- Sagarpa-Siacon, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. (2015). *Sistema de Información Agroalimentario.* México, DF, México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta.
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2010). *Reporte de consumo de agua a nivel residencial.* México, DF, México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

## **Evaluación del coeficiente de reflexión en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S**

### **Numerical and experimental assessment of the reflection coefficient of rubble mound breakwaters with an "S" shaped profile**

Jair-del-Valle<sup>1</sup>

Edgar Mendoza<sup>2</sup>

Juan C. Alcérreca-Huerta<sup>3</sup>

Rodolfo Silva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, [jdelvallem@iingen.unam.mx](mailto:jdelvallem@iingen.unam.mx)

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, [emendozab@iingen.unam.mx](mailto:emendozab@iingen.unam.mx), ORCID: 0000-0002-1991-4721

<sup>3</sup>CONACYT/El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, Quintana Roo, México, [jcalcerreca@conacyt.mx](mailto:jcalcerreca@conacyt.mx)

<sup>4</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, [rsilvac@iingen.unam.mx](mailto:rsilvac@iingen.unam.mx), ORCID: 0000-0003-0064-9558

Autor para correspondencia: Edgar Mendoza, [emendozab@iingen.unam.mx](mailto:emendozab@iingen.unam.mx)

### **Resumen**

La reflexión debida a obras de abrigo es un fenómeno importante de cuantificar dado que, si no se controla, puede provocar problemas a la navegación, a la

operación portuaria y, en casos extremos, a la estabilidad de la misma estructura. Dada la forma en que interactúan los taludes de los rompeolas y el oleaje, el coeficiente de reflexión es prácticamente único para cada tipología y forma de dique, por lo que su cálculo depende, además de las condiciones de clima marítimo, de las propiedades geométricas de la estructura, así como de su porosidad. En este trabajo se presenta una evaluación del coeficiente de reflexión para diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en forma de "S" a partir de resultados obtenidos con el modelo OpenFOAM. Dicha información se comparó contra datos de laboratorio publicados en otras fuentes y contra algunas formulaciones disponibles en la literatura. Los resultados que ofrece el modelo numérico son muy parecidos a los reportados de manera experimental y, el modelo para el cálculo del coeficiente de reflexión obtenido mostró poca dispersión y buena precisión, en comparación con las formulaciones previas, por lo que puede emplearse en los rompeolas originales del estudio y también en otro tipo de estructuras.

**Palabras clave:** coeficiente de reflexión, diques con perfil en S, OpenFOAM.

### **Abstract**

Quantification of the wave reflection from breakwaters is important due to the problems to navigation, port operation and structure stability it may induce. Given the complex interaction between waves and rough slopes, the reflection coefficient is properly unique for each dike type and shape, thus, its estimation depends not only on the wave climate conditions but on the geometry of the structure and its porosity. In this paper a numerical estimation of the reflection coefficient from "S" shaped breakwaters is given from the hydrodynamic results obtained via OpenFoam numerical tool. This information was compared to that published elsewhere and against previous available formulations. The numerical results map well within the ranges experimentally reported, while the best fit model proposed herein showed low dispersion and good precision against the previous formulations. This means that the simple model developed can be used to estimate the reflection coefficient from the originally studied structures and from other several kind of structures as well.

**Keywords:** Reflection coefficient, dykes with S-profile, OpenFOAM.

Recibido: 07/07/2015

Aceptado: 30/07/18

## Introducción

La estimación y estudio de la reflexión debida a estructuras costeras es relevante debido a sus posibles efectos adversos a la navegación por la posible creación de estados de mar peligrosos o caóticos a la entrada de puertos, o por el incremento en la socavación, que puede llevar a la desestabilización y falla de la misma estructura (Zanuttigh & Lykke-Andersen, 2010).

En la práctica ingenieril es común caracterizar la magnitud de la reflexión por medio de un coeficiente de reflexión,  $K_r$ , el cual se define como la proporción de energía que representa el oleaje reflejado ( $H_r$ ), respecto del oleaje incidente ( $H_i$ ). Existen diversos estudios que abordan el tema de la reflexión en diques rompeolas; por ejemplo, Losada y Gimenez-Curto (1981) presentaron un modelo matemático tipo exponencial para evaluar  $K_r$ , considerando una sola pendiente rugosa y oleaje regular; Seelig y Ahrens (1981) integraron varios métodos para predecir la reflexión debida al oleaje, los cuales consideran ecuaciones sencillas para calcular el coeficiente de reflexión en condiciones de rotura y no rotura de las olas, así como en condiciones de oleaje regular e irregular; Davidson, Bird, Huntley y Bullock (1996) propusieron una fórmula para evaluar  $K_r$ , considerando cinco parámetros adimensionales (entre ellos el número de Iribarren,  $\xi$ ), a partir de un proceso de regresión múltiple de una base de datos, la cual está formada por datos de otros investigadores, como Seelig y Ahrens, 1981, Allsop y Channell (1989), Postma (1989), y de datos de una isla natural de roca que actúa como rompeolas; Zanuttigh y Van der Meer (2008) desarrollaron expresiones sencillas estimadas a partir del análisis de una extensa base de datos integrada por información de diferentes geometrías de piezas artificiales (como tetrápodos, *core-loc*, *xbloc*, antifer), el uso de roca permeable o impermeable, una o varias capas protectoras y pendientes lisas o con diferentes rugosidades, con lo cual lograron desarrollar una fórmula simple.

De los diferentes trabajos disponibles en la literatura (Postma, 1989; van der Meer, 1993; Sutherland y O'Donoghue, 1998; Clavero, 2007; Zanuttigh y van der

Meer, 2008; Mendoza, Silva, Clavero, & Losada, 2010, entre muchos otros) se desprende que cada tipología de dique, dada su interacción con el oleaje y desfase entre las ondas incidente y reflejada inducidas por la estructura requiere de un análisis específico, con el fin de proporcionar mejor estimación de la reflexión.

Ante las mejoras computacionales con las que hoy día se cuenta (incluso en una computadora de escritorio), se ha incorporado a las investigaciones de tipo físico el uso de herramientas numéricas para el mejor entendimiento de los fenómenos que ocurren en diferentes campos de la ingeniería. En particular, se pueden mencionar trabajos como los de Del Jesus, Lara y Losada (2012), y Lara, Del Jesus, y Losada (2012), quienes describen el modelo llamado IH-3VOF, el cual es capaz de realizar simulaciones numéricas de la interacción oleaje-estructura utilizando una aproximación tridimensional, considerando las estructuras porosas. Jensen Jacobsen y Christensen (2014) reexaminan las ecuaciones de flujo en medios porosos a través del modelo numérico basado en CFD (siglas en inglés de dinámica de flujos computacional) OpenFOAM. Sus resultados fueron validados para diferentes fenómenos de flujo (*run-up*, *run-down*, entre otros), para oleaje regular e irregular, y la evaluación de rebase.

A la luz de lo anterior, el presente estudio se centra en el análisis numérico de la reflexión generada por un dique rompeolas de piezas sueltas con perfil en S (en adelante nombrados como DRPS-S), que presenta la ventaja de ser un perfil que no se deforma más que con solicitaciones mayores a la de diseño (Mendoza *et al.*, 2010). Para ello, se evaluará el coeficiente de reflexión inducido por la presencia de un DRPS-S con la herramienta OpenFOAM. Para dicha valoración se consideró oleaje regular y los resultados se comparan con los obtenidos por Quiñones (2006), y parte de la información reunida en Zanuttigh y van de Meer (2008).

## **Trabajo numérico**

### **Descripción del modelo**

OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) CFD-Toolbox (*Computational Fluid Dynamics*) es un *software* de uso libre, conformado por un conjunto de librerías que permite la resolución de diversos problemas relacionados con múltiples problemas, incluidos los de dinámica de fluidos (OpenFOAM, 2015).

Para la generación/absorción de ondas superficiales de agua, Jacobsen, Fuhrman, y Fredsøe (2012) desarrollaron una librería llamada *waves2Foam*, que emplea la técnica de zonas de relajación (capas activas tipo esponja) para la generación de oleaje a partir de diferentes teorías analíticas (p. ej., oleaje regular Stokes-I, Stokes -II, Stokes-V; función de flujo; c-noidal, y oleaje irregular). Las zonas de relajación son implementadas para evitar la reflexión de las ondas provenientes de las fronteras, e interferir con las fronteras en la zona de generación de las ondas (primera zona de relajación). Por otro lado, la librería *wavePorousFoam* desarrollada por Alcérreca-Huerta (2014), y aplicada a recubrimientos porosos de playa, permite considerar la propagación del oleaje al interior de uno o varios obstáculos porosos. Dicho modelo integra las capacidades de la librería *waves2foam* respecto de la generación/absorción de oleaje, y de simular el flujo a través de la definición explícita de estructuras porosas, considerando la interacción de dos fluidos (p. ej., agua y aire) no miscibles, isotérmicos e incompresibles. Para ello, *wavePorousFoam* resuelve las ecuaciones de gobierno VARANS (*Volume Average Reynolds Average Navier-Stokes*) y emplea la técnica VOF para la definición de interfaz entre fluidos. Sobre estas ecuaciones se pueden consultar los trabajos de Hsu, Sakakiyama y Liu (2002); Del Jesus *et al.* (2012), y Jensen *et al.* (2014). La forma matemática de las ecuaciones VARANS utilizadas en este trabajo es el esquema presentado en Alcérreca-Huerta y Oumeraci (2016):

Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momento



$$\frac{\rho}{n} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\rho}{n^2} \nabla(UU) = -\nabla P + g \cdot X \nabla \rho + \frac{1}{n} \nabla \mu_{eff} \nabla U + \sigma_{eff} \kappa \nabla \gamma - [CT] \quad (2)$$

Donde  $P$  es la presión;  $g$ , aceleración de la gravedad;  $n$ , porosidad;  $X$ , coordenadas cartesianas;  $\rho$ , densidad promedio ponderada de los fluidos de acuerdo con la fracción de volumen y ocupado por cada fase o fluido en una celda;  $U$ , velocidad. La viscosidad dinámica turbulenta  $\mu_{eff}$  se calcula como  $\mu_{eff} = \mu_t + \mu$ , siendo  $\mu_t$  la viscosidad turbulenta dinámica estimada con ayuda del  $k$ - $\epsilon$  modelo (Nakayama & Kuwahara, 1999) y  $\mu$  como la viscosidad dinámica media ponderada. El término  $\sigma_t \kappa \nabla \gamma$  representa la tensión superficial entre las dos fases, donde  $\sigma$  = tensión superficial y  $\kappa$  es la curvatura de la interface  $\kappa = \nabla \cdot (n / |n|)$  con  $n = \nabla \gamma$ .

El término  $CT$  se define (de acuerdo con Van Gent, 1995) como:

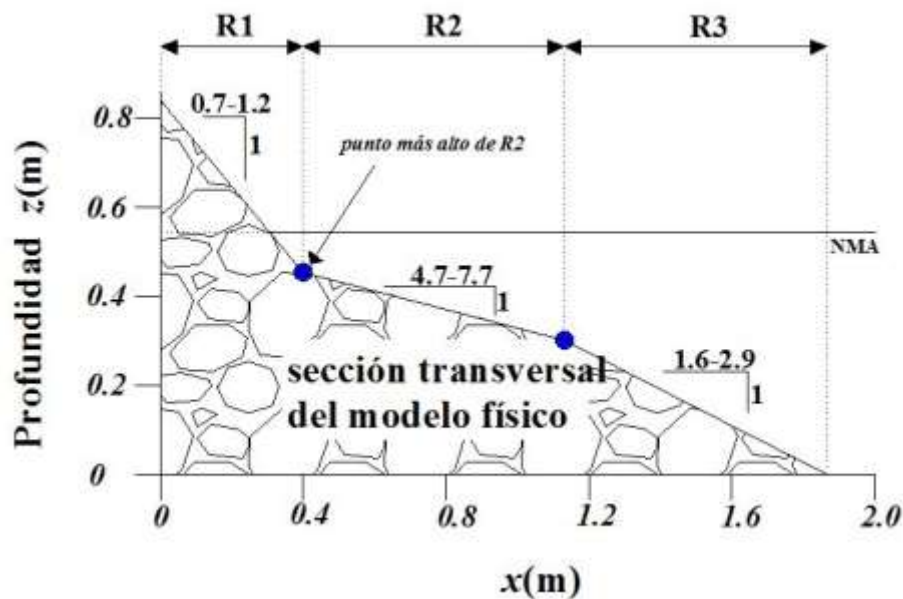
$$[CT] = \rho g \left( aU + b|U|U + C_A \frac{\partial}{\partial t} U \right) \quad (3)$$

Los coeficientes  $a$  y  $b$  se pueden estimar con diferentes formulaciones matemáticas. El coeficiente  $C_A$  es definido por Van Gent (1993) para flujo estacionario y oscilatorio a través de medios porosos, llegando a la ecuación (4), en la cual el coeficiente  $\gamma_{vG}$  vale 0.34.

$$C_A = \frac{1 + \gamma_{vG} \frac{(1-n)}{n}}{ng} \quad (4)$$

## Geometría de la sección transversal

El cálculo de las dimensiones de la sección transversal de un DRPS-S se realizó siguiendo la metodología propuesta por Mendoza *et al.* (2010), la cual se puede resumir como (Figura 1):

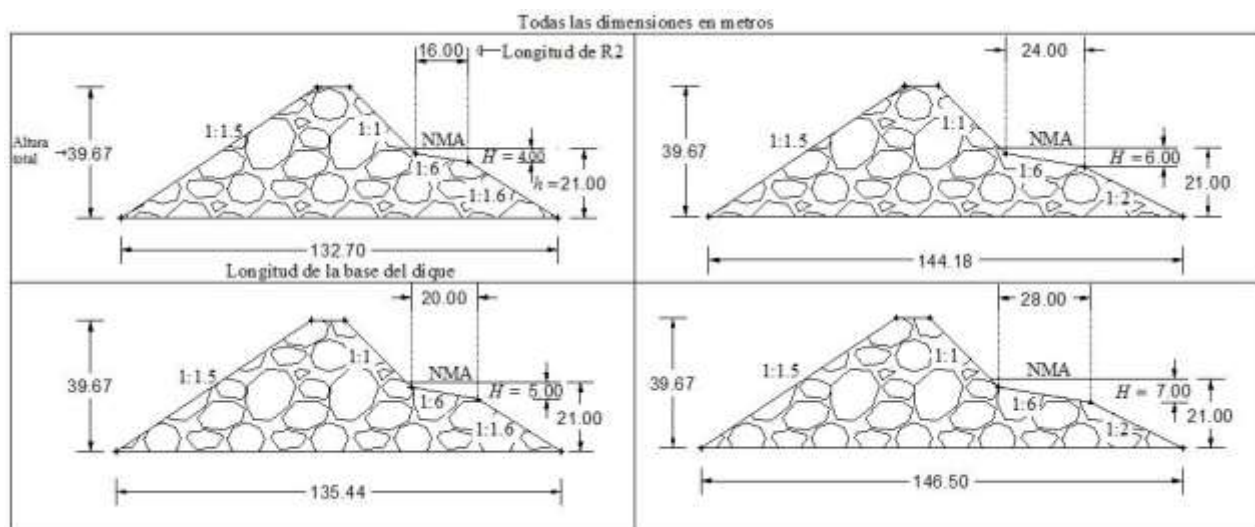


**Figura 1.** Valores propuestos por Mendoza *et al.* (2010) para cada una de las tres pendientes que conforman el perfil de un DRPS-S.

- Conocida la altura de ola de diseño ( $H$ ), se determina el punto más bajo de la zona R2, que tiene una profundidad igual a  $H$ . El cociente  $R2 / H$  debe encontrarse entre  $2 < R2 / H < 5$ . R2 no debe cruzar el nivel de agua en reposo.
- Desde el punto más alto de R2 se traza R1, y su cota máxima deberá asegurar que el dique no sea rebasable. El cociente  $R1 / H$  debe encontrarse entre  $2 < R1 / H < 4$ .
- Por último, desde el punto más bajo de la región R2, se traza la región R3. El cociente  $R3 / H$  debe encontrarse entre  $4 < R3 / H < 5$ .

Cabe destacar que en el inciso a), la restricción  $2 < R2 / H < 5$ , en conjunto con alguno de los valores de pendiente que se elija para la zona R2, se asegura que el punto más alto de R2 no cruce el nivel medio del agua.

A partir de esta metodología de diseño geométrico se propusieron cuatro alturas de ola de diseño ( $H = 4, 5, 6$  y  $7$  m), con lo que se obtuvieron las secciones transversales mostradas en la Figura 2. Además, en dicha figura también se pueden observar los valores elegidos para las pendientes de las tres regiones del DRPS-S, es decir R1, R2 y R3.



**Figura 2.** Dimensiones de las cuatro secciones transversales de los DRPS-S modeladas numéricamente.

## Porosidad

Se utilizaron diferentes valores de porosidad. En una primera etapa del trabajo numérico sólo se usó un único valor de porosidad  $n = 0.45$ , a fin de obtener diferentes valores del coeficiente de reflexión  $K_r$ , en función del número de Iribarren  $\xi$ , para después comparar dichos resultados con datos medidos disponibles. En una segunda etapa del trabajo numérico se emplearon diferentes valores de porosidad, incluido el valor de 0.45 mencionado antes; ello, con la

finalidad de observar el efecto que tiene este parámetro sobre el valor del  $K_r$ . Más adelante se describe con detalle el trabajo llevado a cabo de estas dos etapas.

## Características del oleaje empleado

El oleaje empleado es regular, representado por los valores de altura de ola  $H = 4, 5, 6$  y  $7$  m. Se modelaron cuatro periodos de ola con valores  $T = 9, 10, 11$  y  $12$  s. Pero también se consideró el valor de  $T = 8$  s, en combinación sólo con el valor de  $H = 7$  m. Para todos los estados de mar, el tipo de representación analítica más adecuado para el oleaje fue el de Stokes de quinto orden.

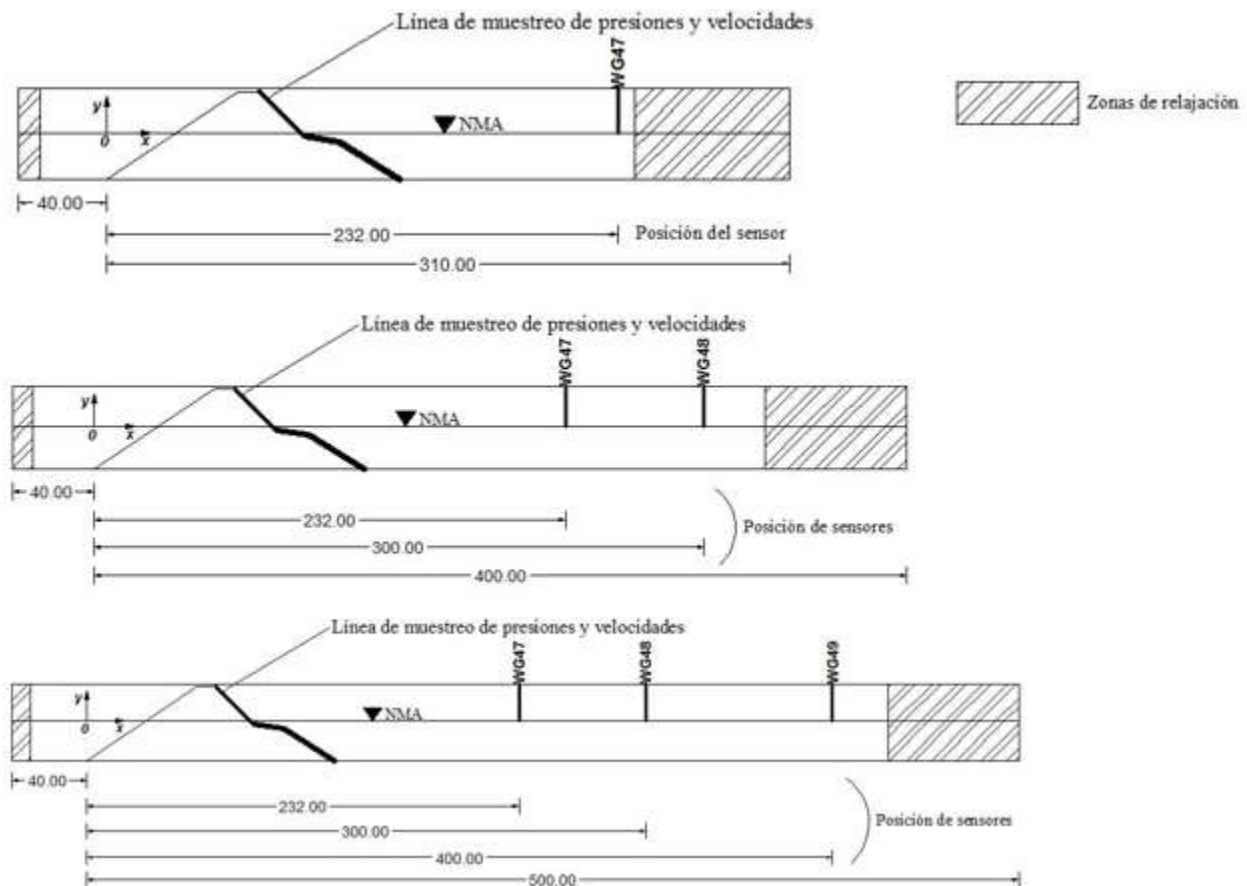
De esta forma se tienen un total de 17 estados de mar (como consecuencia de la combinación de las cuatro alturas de ola con los cuatro periodos, más el estado de mar adicional  $H = 7$  m,  $T = 8$  s). Cabe recordar que las cuatro alturas de ola dan las dimensiones de cada una de las secciones transversales mostradas en la Figura 2.

## Determinación de la longitud del dominio de cálculo

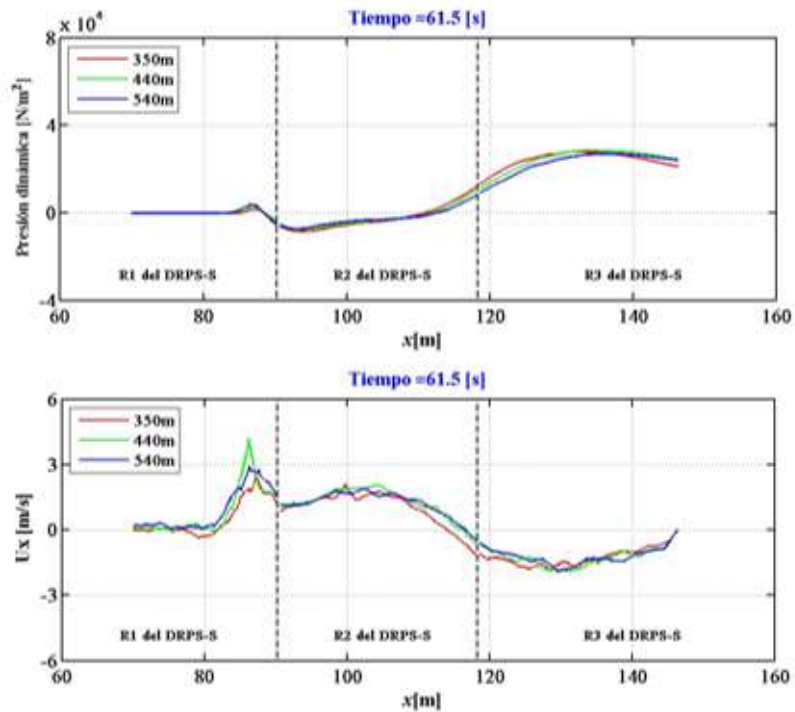
Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad respecto de la longitud del dominio de cálculo, con el fin de optimizar el tiempo de simulación, en el entendido que a mayor longitud del dominio computacional, mayor será el tiempo requerido por la modelación. Se probaron diferentes longitudes del dominio de cálculo —310, 400 y 500 m—, con la condición de que al menos una longitud de onda fuera visible (esto es, que se viera una cresta y un valle por lo menos) en dicha zona. El caso elegido para este análisis fue el de 9 s (menor longitud de onda) y  $H = 7$  m (mayor altura de ola). Se añadieron 40 m más a barlomar del dique rompeolas, a

fin de tener espacio para estimar el oleaje transmitido y para las zonas de relajación. El tiempo de simulación para cada caso fue de 120 segundos.

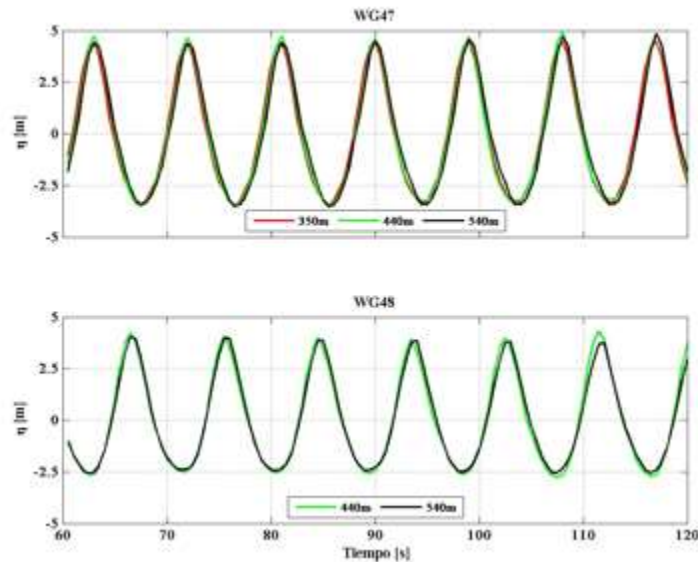
La comparación entre resultados se efectuó con base en los valores de presión dinámica, velocidad y nivel del agua sobre la cara del DRPS-S. La posición tanto de los sensores de nivel como de la línea de muestreo se señala en la Figura 3. La Figura 4 muestra los resultados de la presión dinámica y velocidad, mientras que los correspondientes para el nivel del agua se presentan en la Figura 5.



**Figura 3.** Longitudes de dominio de cálculo y posición de sensores de nivel.



**Figura 4.** En el panel superior, comparación de la presión dinámica para el instante de tiempo  $t = 61.5$  s a lo largo del perfil en S para las tres longitudes propuestas. En el panel inferior, comparación de la componente horizontal de la velocidad a lo largo del perfil en S.



**Figura 5.** Comparación de los resultados de los sensores de nivel comunes a las longitudes del dominio de cálculo propuestas.

Al revisar los resultados mostrados en la Figura 4 y Figura 5 no se observan variaciones significativas en los resultados de presión, velocidad y nivel de agua. Por ejemplo, los errores relativos al comparar los valores de superficie del agua de las longitudes de 440 y 540 m contra los valores de superficie de la longitud de 350 m se obtuvieron errores entre 8 y 20%. A partir de lo anterior, se decidió que la longitud final de cálculo fuera de 350 m. Es importante mencionar que el tamaño de celda se mantuvo constante para las tres longitudes analizadas. Los tamaños de celda fueron de 1 m al inicio del dominio y en las inmediaciones del dique 0.5 m.

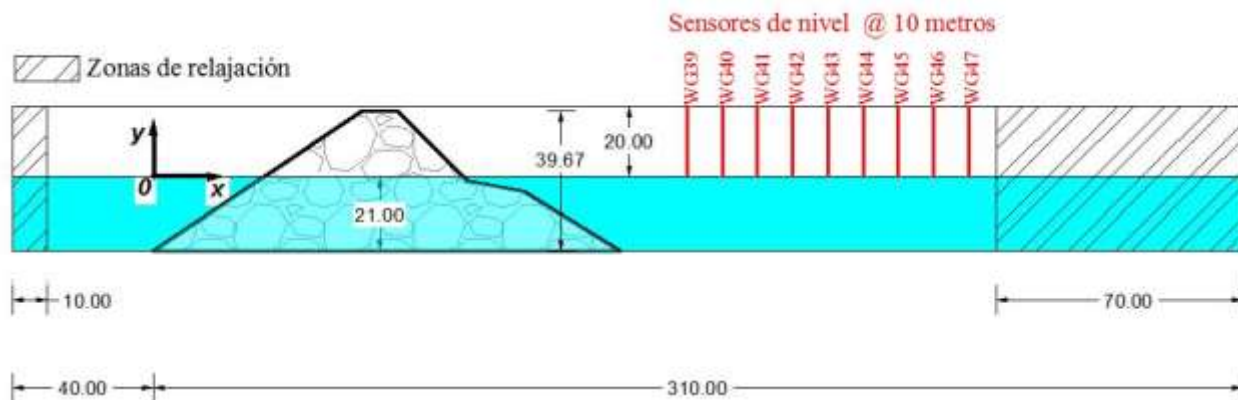
## Características del medio poroso

Para hacer la representación de un DRPS-S como un medio poroso continuo, se requiere conocer los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  de la ecuación (3). Existen

en la literatura algunas formulaciones para el cálculo de estos coeficientes (p. ej., Ergun, 1952; Engelund, 1953; Koenders, 1985; Shih, 1990). La versión 2.1.0 de OpenFOAM utiliza la formulación de Engelund (1953), lo cual se consideró aceptable para este trabajo.

## Metodología y casos de estudio

Para evaluar el coeficiente de reflexión se consideró la expresión  $K_r = |H_r / H_i|$ . Las series de tiempo donde se registró la variación de la superficie libre se obtuvieron a partir de la ubicación de nueve sensores de nivel distribuidos cada 10 m desde de la posición  $x = 152$  m y en dirección hacia el DRPS-S (Figura 6).



**Figura 6.** Posición de los sensores de nivel.

Asimismo, se consideraron dos casos de estudio en función del coeficiente de reflexión y de su afectación por efecto de la porosidad. En el primer caso se evaluó el coeficiente de reflexión considerando un valor de porosidad  $n = 0.45$ . Para tal efecto se modelaron los 16 estados de mar ya mencionados, con el propósito de observar las variaciones de  $K_r$  debido a la presencia de la estructura. En el segundo caso se analizó  $K_r$ , tomando en cuenta diferentes valores de porosidad y considerando seis estados de mar ( $H$  (m),  $T$  (s)): (5, 9), (6, 9), (6, 140



10), (7, 8), (7, 9) y (7, 10). En cada estado de mar se modelaron 10 valores de porosidad, los cuales son  $n = 0.05, 0.35, 0.37, 0.40, 0.42, 0.45, 0.47, 0.50, 0.52$  y 0.55.

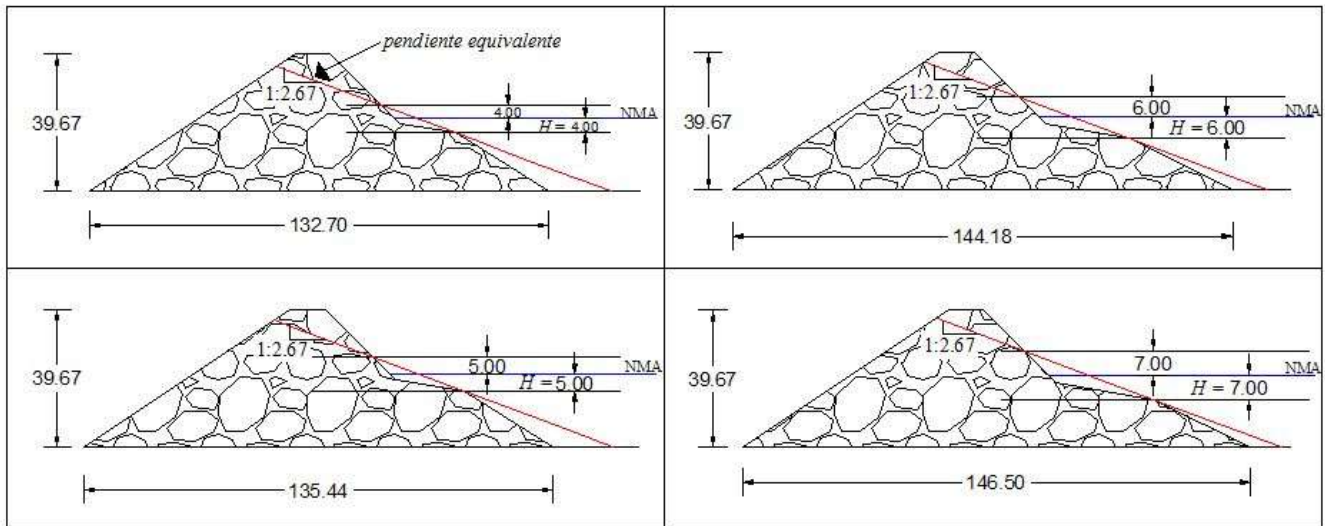
Para determinar el valor de la altura de ola reflejada ( $H_r$ ) y, por lo tanto, el valor de  $K_r$ , se empleó la metodología siguiente:

- Las simulaciones consideraron 120 s bajo las condiciones de oleaje regular antes mencionadas. Para el análisis de resultados se consideraron los últimos 60 segundos de la simulación ( $\sim 10$  periodos de ola como mínimo).
- Sin considerar los primeros segundos de simulación, se corrigió el nivel medio del agua por medio del método de corrección aritmética (Silva, 2005). La corrección se hizo obteniendo el promedio de la serie de tiempo de oleaje; a continuación se le restó este valor promedio a cada valor de la serie de tiempo, dando así la nueva serie de tiempo corregida.
- Considerando la nueva serie corregida y al tratarse de oleaje regular, existe una única altura de ola incidente ( $H_i$ ). Como consecuencia de ello, también se considera una única altura de ola reflejada ( $H_r$ ), aunque no necesariamente en la misma fase debido a la geometría del perfil en S. Matemáticamente esto se representa por la expresión  $H_T = H_i + H_r$ , en donde  $H_T$  es la altura de ola total.

## Pendiente equivalente

Por último, el parámetro adimensional que mejor describe el comportamiento del coeficiente de reflexión es el número de Iribarren o parámetro de surf  $\xi(-)$ . Para estimarlo, en el caso de los DRPS-S, es necesario definir un valor de una pendiente equivalente que represente la hidrodinámica del perfil. Para ello se empleó el procedimiento propuesto por van der Meer (1992), el cual toma como unidad de medida de referencia el valor de la altura de ola incidente ( $H_i$ ). Así, se determina una distancia igual a esta unidad tanto por arriba como por debajo del nivel medio del agua. Se trazan líneas paralelas al nivel medio del agua, las cuales cruzan el perfil en S. Los puntos de cruce sirven como referencia para trazar una línea cuya pendiente es la equivalente requerida. En la Figura 7 se

ejemplifica este procedimiento, obteniendo en las cuatro secciones transversales de DRPS-S a trabajar el valor de 1:2.67.

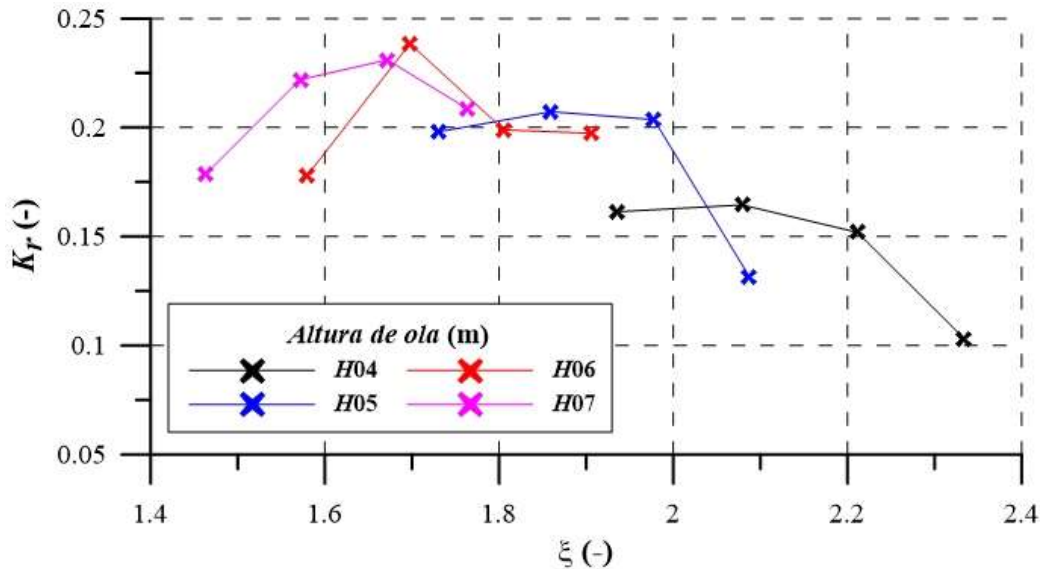


**Figura 7.** Definición de la pendiente equivalente para las cuatro secciones transversales planteadas.

## Resultados

### Coeficiente de reflexión como función del número de Iribarren

En la Figura 8 se muestran los valores de  $K_r$  en función del número de Iribarren.



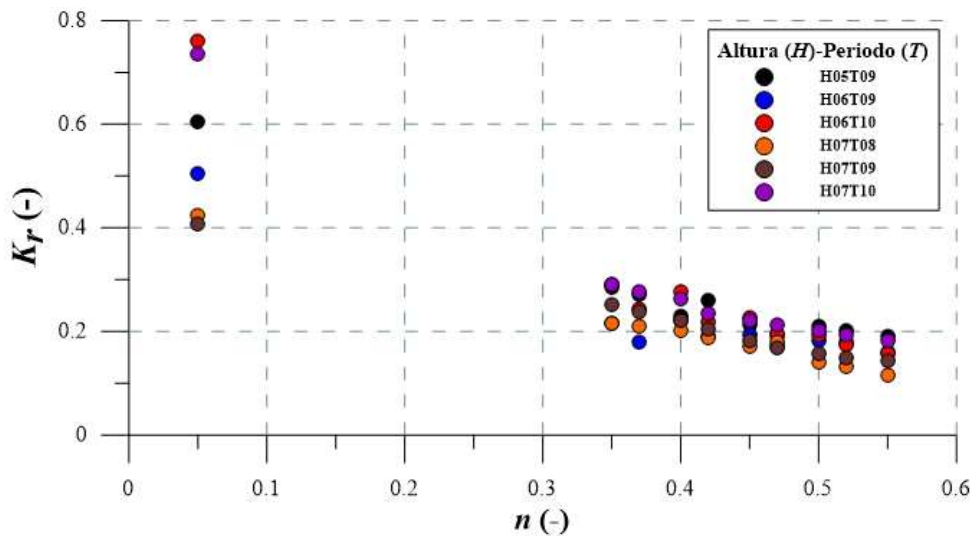
**Figura 8.** Coeficiente de reflexión como función del número de Iribarren.

De la Figura 8 se desprende lo siguiente:

- La magnitud del coeficiente de reflexión aumenta conforme la altura de ola se incrementa
- El comportamiento del coeficiente de reflexión para distintos números de Iribarren es congruente con la forma conocida.
- La rotura tipo voluta se da por lo general para números de Iribarren menores o iguales que 2. La mayoría de los resultados de  $K_r$  caen dentro de este rango y están asociados para las alturas de ola de 5, 6 y 7 m. Esto puede dar indicios de que el perfil en S propicie la rotura tipo voluta para altura de olas grandes, lo cual se puede considerar muy ventajoso, pues se busca la mayor disipación de energía del oleaje sobre el perfil en S.
- Los valores de reflexión obtenidos coinciden con los reportados por Quiñones (2006).

## Coeficiente de reflexión como función de la porosidad

En la Figura 9 se muestran los resultados de  $K_r$  en función de la porosidad. Es claro que a menor porosidad mayor será el valor de  $K_r$ . Asimismo, se presentan los valores de  $K_r$  cuando  $n$  toma un valor muy pequeño (en este caso, 0.05), a fin de mostrar el caso impermeable.

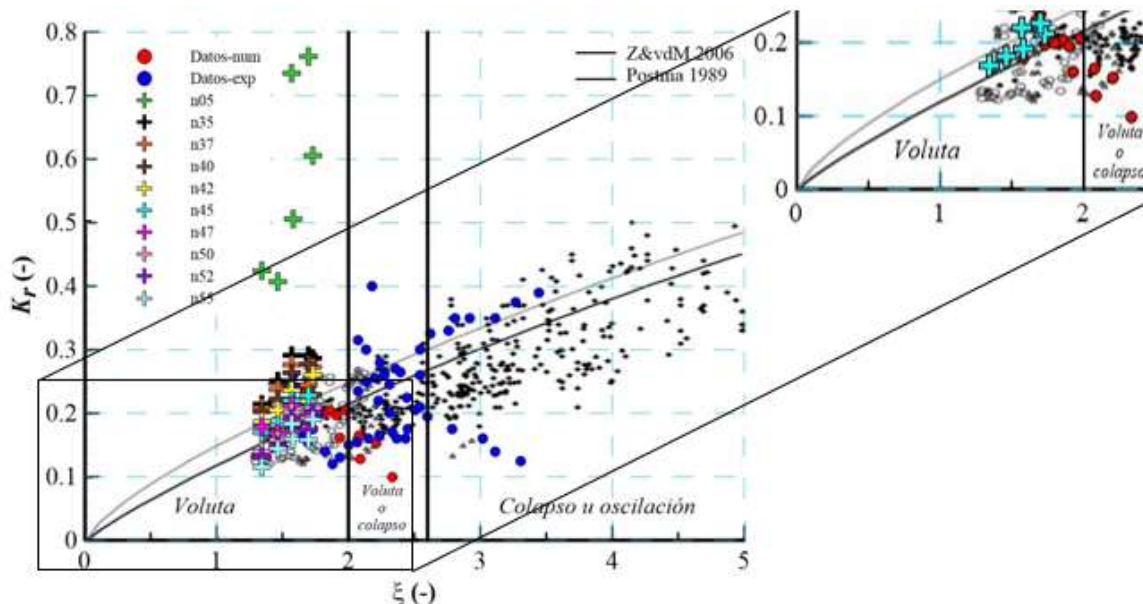


**Figura 9.** Coeficiente de reflexión como función de la porosidad.

## Comparación y discusión de los resultados numéricos

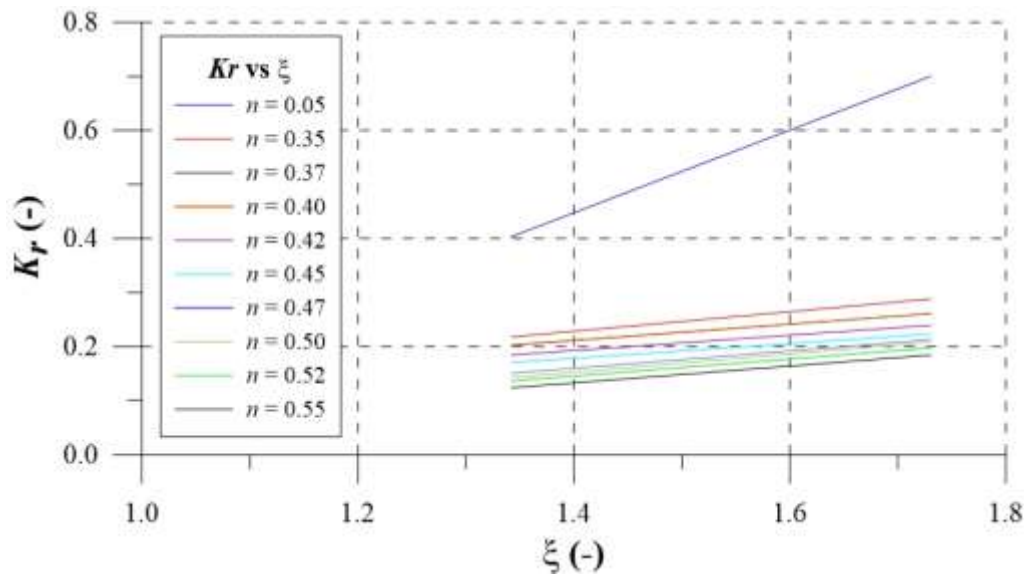
Se realizó una comparación entre los resultados numéricos obtenidos y datos de coeficientes de reflexión estimados en los trabajos experimentales de Quiñones (2006), y los presentados en Zanuttigh y van der Meer (2008); dicha comparación se muestra en la Figura 10. En ella se puede observar que los resultados numéricos están dentro del rango de variación de los obtenidos en el modelo físico. Cabe mencionar que el tipo de rotura es de tipo voluta para la mayoría de los datos numéricos, mientras que los datos experimentales, en su

mayor parte, presentan una rotura tipo colapso (*surging-waves*). Es importante señalar que los datos numéricos dibujados en la Figura 10 son los obtenidos para el valor de porosidad de 0.45.



**Figura 10.** En el panel de la izquierda, comparación de los resultados numéricos contra los del Quiñones (2006), y los presentados en Zanuttigh y van der Meer (2008). En el panel de la derecha, acercamiento a los números de Iribarren más bajos.

La combinación de los dos casos numéricos ejecutados permite incluir, en el cálculo del coeficiente de reflexión, la dependencia simultánea del número de Iribarren y de la porosidad. La consideración de la porosidad es importante, dado que dicho valor puede cambiar a lo largo de la vida útil de un rompeolas por movimiento de las piezas del manto principal o por colmatación de los intersticios con el material que viaja en suspensión. Es así que dibujando los resultados de la modelación se obtuvieron curvas de mejor ajuste (se eligieron ecuaciones lineales, ver Figura 11), con el fin de sentar las bases de una familia de ecuaciones que permita estimar el coeficiente de reflexión de DRPS-S como función del número de Iribarren y de la porosidad. Los valores de la pendiente y ordenada al origen de esta familia de rectas se resumen en la Tabla 1.



**Figura 11.** Curvas de ajuste:  $Kr = f(\xi)$ . Los coeficientes del modelo lineal se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros de mejor ajuste (pendiente y ordenada al origen) de las curvas de coeficiente de reflexión como función de la porosidad.

$n$	$m$	$b$
0.05	0.7644	-0.6226
0.35	0.1809	-0.0249
0.37	0.1500	0.0017
0.40	0.1506	0.0000
0.42	0.1414	-0.0053
0.45	0.1356	-0.0116
0.47	0.1600	-0.6412
0.50	0.1678	-0.0822
0.52	0.1577	-0.0754
0.55	0.1557	-0.0852

Con el fin de evaluar el desempeño de las rectas propuestas, en la Figura 12 se muestra una comparación entre los resultados que ellas ofrecen con los

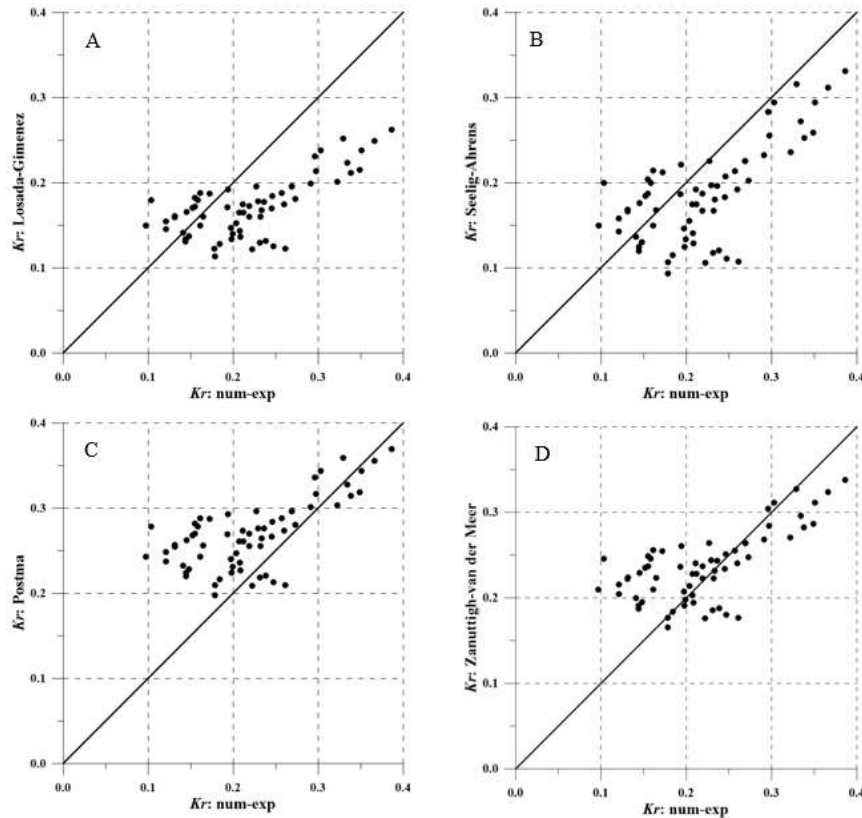
resultados de expresiones disponibles en la literatura, a saber, Losada y Gimenez-Curto (1981) (ecuación (5)); Seelig y Ahrens (1981) (ecuación (6)); Postma (1989) (ecuación (7)), y Zanuttigh y van der Meer (2008) (ecuación (8)), las cuales se presentan a continuación:

$$K_r = 3.999 * [1 - \exp(-0.0197 * \xi)] \quad (5)$$

$$K_r = (0.75 * \xi^2)/(15 + \xi^2) \quad (6)$$

$$K_r = 0.15 * \xi_0^{0.73} \quad (7)$$

$$K_r = \tanh(0.12 * \xi_0^{0.87}) \quad (8)$$



**Figura 12.** Comparación entre los resultados con las ecuaciones lineales (Tabla 1) con los valores dados por panel A, ecuación (5); panel B, ecuación (6); panel C, ecuación (7), y panel D, ecuación (8).

La ecuación de Losada y Giménez-Curto (1981) ofrece valores de reflexión un poco menores que las estimadas en las rectas de la Tabla 1 (ver Figura 12, panel A) debido a que aunque dichos autores sí consideran la porosidad; el talud para el que aplica la expresión es recto y homogéneo. Se encontró el error promedio y desviación estándar: 26.1 y 13.5%, respectivamente. En el panel B de la Figura 12 se muestra la comparación entre la ecuación de Seelig y Ahrens (1981) y la familia de rectas de la Tabla 1; estas últimas ofrecen valores un poco mayores, pero el ajuste es aceptable; se calculó un error promedio de 24.6% y una desviación estándar de 16.3%. En el panel C se comparan la ecuación de Postma (1989) con la familia de rectas aquí propuesta; en este caso, el error promedio es de 34.7%, con una desviación estándar de 37%; aquí las rectas propuestas



estiman mayores valores del coeficiente de reflexión que la ecuación previa, sin que la dispersión sea demasiado alta. Por último, en el panel D, la ecuación de Zanuttigh y van der Meer (2008) se compara contra las rectas descritas en la Tabla 1; se obtuvo un error promedio de 24.3%, con una desviación estándar de 28.5%; es el caso con menor diferencia entre las expresiones comparadas.

De lo observado en la Figura 12 se puede decir que la familia de rectas resumida en la Tabla 1 es una herramienta útil para estimar el coeficiente de reflexión debido a un DPRS y también a otro tipo de rompeolas.

## Conclusiones

Se llevó a cabo un trabajo numérico para estimar las condiciones hidrodinámicas inducidas por la interacción entre oleaje y un dique rompeolas de perfil en S. A partir de ello se estimó el coeficiente de reflexión resultante de dicha interacción para el caso de ondas regulares (Stokes V). Se eligieron como grados de libertad en la modelación numérica las condiciones de oleaje incidente y la porosidad del rompeolas, lo que permitió desarrollar un modelo, conformado por una familia de rectas, para estimar de manera directa el coeficiente de reflexión como función de los valores de dichos grados de libertad. Los resultados de la modelación se compararon contra datos experimentales disponibles en la literatura, mostrando un mapeo dentro de los mismos rangos.

Una vez definido el modelo de estimación directa del coeficiente de reflexión, se comparó contra formulaciones previas para las mismas condiciones. Se encontró poca dispersión y errores bajos, por lo que se concluye que el modelo propuesto es capaz de estimar la reflexión debida a un DPRS, pero también la debida a otros tipos de rompeolas con precisión aceptable.

## Referencias

- Alcérreca-Huerta, J. C. (2014). *Process-based modelling of waves interacting with porous bonded revetments and their sand foundation* (Ph.D-thesis). Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Alemania.
- Alcérreca-Huerta, J. C., & Oumeraci, H. (2016). Wave-induced pressures in porous bonded revetments. Part I: Pressures on the revetment. *Coastal Engineering*, (110), 87-101.
- Allsop, W., & Channell, A. (1989). Wave reflection in harbours: Reflection performance of rock armoured slopes in random waves. *Hydraulic Research Report* (OD 102), Ed. HR Wallingford, Wallingford, Oxfordshire, Reino Unido.
- Clavero, M. (2007). *Comportamiento de los diques en talud frente a la acción del oleaje y criterios para el reparto de la probabilidad conjunta de fallo en la vida útil* (Ph.D-thesis). Universidad de Granada, España.
- Davidson, M. A. Bird, P. A. Huntley, D. A., & Bullock, G. N. (1996). Prediction of wave reflection from rock structures: an integration of field & laboratory data (pp. 2077-2086). In: *Procedures 25<sup>th</sup> ICCE*, ASCE, Nueva York, EUA.
- Del Jesus, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2012). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures. Part I: Numerical model formulation. *Coastal Engineering*, (64), 57-72.
- Engelund, F. (1953). *On the laminar and turbulent flow of groundwater through homogeneous sand*. Trans. Danish Academy of Technical Sciences, København, Dinamarca.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48, 89-94.
- Hsu, T. J., Sakakiyama, T., & Liu, P. L. F. (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal Engineering*, 46, pp. 25-50.
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., & Fredsøe, J. (2012). "A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM<sup>®</sup>". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70, 1073-1088.
- Jensen, B., Jacobsen, N. G., & Christensen, E. D. (2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures. *Coastal Engineering*, 84, 56-72.

- Koenders, M. A. (1985). *Hydraulic criteria for filters*. London: Estuary Physics Publ., Londres, Reino Unido.
- Lara, J. L., Del Jesus, M., & Losada, I. J. (2012). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures. Part II: Experimental validation. *Coastal Engineering*, (64), 26-46.
- Losada, M., & Gimenez-Curto, L. A. (1981). Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action. *Coastal Engineering*, (4), 187-206.
- Mendoza, E., Silva, R., Clavero, M., & Losada, M. (2010). Evolución del comportamiento hidráulico y de la geometría de diques homogéneos al ser deformados por el oleaje. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(2), 21-35.
- Nakayama, A., & Kuwahara, F. (1999). A macroscopic turbulence model for flow in porous media. *J. Fluids Eng.*, (121), 427-433.
- OpenFOAM. (2015). *OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. User Guide. Version 3.0.1*. OpenFoam Foundation Ltd., Londres, Reino Unido.
- Postma, G. M. (1989). *Wave reflection from rock slopes under random wave attacks* (Ph.D-thesis). Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Quiñones, J. L. (2006). *Estabilidad de diques en talud* (Master thesis). Faculty of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Seelig, W. N., & Ahrens, J. P. (1981). *Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments and breakwaters*. CERC Tech. (paper 81-1). USACE, Vicksburg, EUA.
- Shih, R. W. K. (1990). *Permeability characteristics of rubble material, new formulae* (pp. 1499-1512). International Conference of Coastal Engineering, Delft, Holanda.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje* (Publication SD/49). Engineering Institute, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sutherland, J., & O'Donoghue, T. (1998). Characteristics of wave reflection spectra. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, (124), 303-311.
- Van der Meer, J. W. (1992). Stability of the seaward slope of berm breakwaters. *Coastal Engineering*, 16, 205-234.
- Van der Meer, J. W. (1993). *Conceptual design of rubble mound breakwaters* (publication number 483). Delft Hydraulics, Holanda.

- Van Gent, M. R. (1993). *Stationary and oscillatory flow through coarse porous media* (Ph.D-thesis). Communications on Hydraulic Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Van Gent, M. R. (1995). Porous flow through rubble-mound material. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, (121), 176-181.
- Zanuttigh, B., & van der Meer, J. W. (2008). Wave reflection from coastal structures in design conditions. *Coastal Engineering*, 55, 771-779.
- Zanuttigh, B., & Lykke-Andersen, T. (2010). Wave reflection in 3D conditions. *Coastal Engineering*, 57, 531-538.

**Observaciones y análisis de parámetros  
hidromorfológicos de la playa Las Glorias, México**  
**Observation and analysis of hydro-morphologic  
parameters in Las Glorias beach, Mexico**

Cuauhtémoc Franco-Ochoa<sup>1</sup>

Fernando García-Paéz<sup>2</sup>

Wenseslao Plata-Rocha<sup>3</sup>

José Miguel Montoya-Rodríguez<sup>4</sup>

Miguel Ángel Vergara-Sánchez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México,  
cfrancoo@uas.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7554-3603>

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México,  
garpaez@uas.uasnet.mx

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México,  
wenses@uas.edu.mx

<sup>4</sup>Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México,  
mmontoya@imt.mx

<sup>5</sup>Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México  
mvergara@ipn.mx

Autor para correspondencia: Cuauhtémoc Franco-Ochoa,  
cfrancoo@uas.edu.mx

## Resumen

Con base en mediciones y muestreos realizados trimestralmente a lo largo de 18 perfiles de la playa Las Glorias a partir de agosto de 2015 hasta mayo de 2016 y con los datos de oleaje proporcionados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), por un lado, se analiza los cambios del perfil de la playa y su relación con el régimen de oleaje que incide sobre ella y, por otro lado, se proporciona una base de datos que incluye el análisis de datos de oleaje, sedimento y morfología de la playa para futuros estudios sobre su morfodinámica. Los resultados revelaron que la distribución de sedimentos en la playa es espacial y temporalmente muy homogénea y que el ciclo interanual de cambio del perfil de playa responde al régimen estacional del oleaje.

**Palabras clave:** perfil de playa, playa Las Glorias, oleaje, morfología.

### **Abstract**

The aim of this study was to provide and analyze wave, sediment and morphology data of the Las Glorias beach, which on one side allow to determine the variability of the beach profile and its relationship with the wave regime, and on another side provides a base data including sedimentology for their further studies on morphodynamics. The sediment and morphology data of the Las Glorias beach were collected along eighteen beach profiles quarterly, from August 2015 to May 2016, and the wave data was provided by the Mexican Institute of Transportation. The results show that the distribution of sediments on the beach is very homogeneous and the changes in the beach profile responds faithfully to the seasonal variation of the waves.

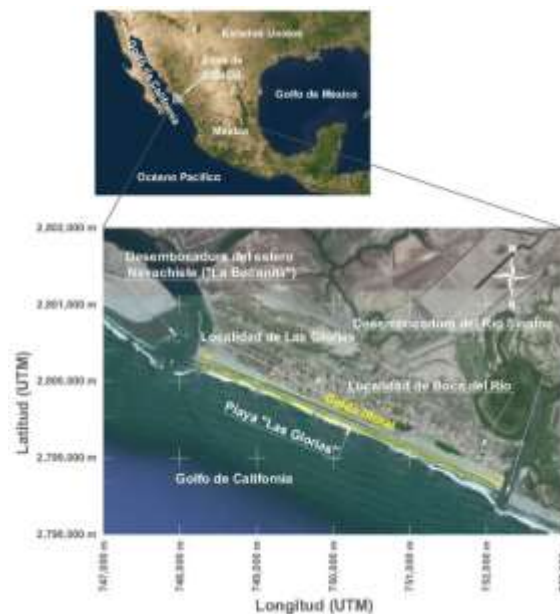
**Keywords:** Beach profile, Las Glorias Beach, waves, morphology.

Recibido: 13/01/2018

Aceptado: 08/08/2018

## **Introducción**

La playa "Las Glorias" se localiza en el Golfo de California, sobre el litoral del estado de Sinaloa, entre los meridianos 747 000 m y 753 000 m, y los paralelos 2 798 000 m y 2 802 000 m de la zona 12 norte del sistema de proyección UTM (Figura 1). Tiene una extensión aproximada de 5 km. Está limitada en sus extremos por escolleras basadas en roca. Su morfología en planta es prácticamente recta, con batimetría paralela. Hacia la playa descargan dos cuencas hidrológicas: la cuenca del río Sinaloa y la cuenca Bahía Lechuguilla-Ohuira-Navachiste. El clima es árido y semiárido, con lluvias principalmente en verano (García, 2004). En el frente de esta playa se presentan mareas astronómicas mixtas, con predominancia semidiurna (SMN, 2018); es decir, se producen dos pleamares y dos bajamares durante cada día lunar, y los niveles de dos pleamares o bajamares consecutivos son similares por lo general. La amplitud de estas mareas se ubica en el rango micromareal (menor a 2 m) de acuerdo con la clasificación de Davies (1964).



**Figura 1.** Localización de la playa "Las Glorias", Sinaloa, México.

De acuerdo con Alcántar (2007), en la década de 1980 se podía observar la formación de flechas de arena frente a las desembocaduras del río Sinaloa y del estero Navachiste debido a la interacción entre oleaje, corrientes y transporte litoral. La flecha frente al río Sinaloa provocó que el río cambiara su curso hacia el noroeste y desembocara aproximadamente a la mitad de la playa Las Glorias. En la misma década se terminaron de construir las presas Lic. Gustavo Díaz Ordaz y Lic. Guillermo Blake Aguilar sobre los cauces del río Sinaloa y de su principal afluente, el arroyo Oconori, respectivamente, lo que provocó una drástica reducción del aporte de sedimento hacia la playa, dando como consecuencia una descompensación sedimentaria que generó así el inicio de la erosión de la playa.

Después, a inicios del decenio de 1990, se dragó un canal sobre la playa, con el propósito de reubicar hacia el sureste la desembocadura del río Sinaloa; al mismo tiempo, se construyeron dos escolleras basadas en roca, con la finalidad de estabilizar en lo horizontal dicha desembocadura.

Así, por un lado, en la parte posterior de la playa se generaron pequeñas lagunas, producto del meandro antiguo del río Sinaloa, y por otro, se generó una barrera física que interrumpía el paso del transporte de sedimento litoral hacia el lado de la playa Las Glorias. Esto agravó la descompensación sedimentaria en la que se encontraba.

En cuanto a los cambios de la línea de costa de la playa, Alcántar (2007) estimó que ésta retrocedió 149 m lineales entre 1980 y 2004, con una tasa promedio de erosión de 6.2 m/año. La mayor tasa de erosión se presentó entre 1990 y 1994, siendo de 9.2 m/año, erosión que podría estar asociada con la construcción de las escolleras en la desembocadura del río Sinaloa en 1992 y 1993. En cuanto a los perfiles, reporta que el de erosión se presenta en verano, mientras que el de acreción en invierno.

Con el venir de los años se han realizado algunas acciones enfocadas a la restauración y recuperación de la playa Las Glorias. Las más importantes se efectuaron en 2006, y consistieron en un relleno de playa en una longitud de 2 km y un ancho promedio de 71.50 m, con una elevación de + 1.0 m sobre el nivel de baja mar media inferior



(NBMI), y la construcción de una escollera en la desembocadura del estero Navachiste; aunque se proyectó para una longitud de 311.90 m, sólo se construyeron 146.90 m (Limón, 2010). En relación con la respuesta de la playa a estas obras, Zayas (2010) reportó que entre 2003 y 2008 se presentó tanto avance como retroceso de la línea de costa de la playa; en general, la línea de costa avanzó al noroeste de la playa debido a la acumulación de sedimentos en la escollera, mientras que en el resto de la playa la línea de costa retrocedió, sobre todo en la zona de las construcciones.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que la playa se encuentra bajo considerables condiciones de alteración antrópica, en particular por la construcción de obras de ingeniería tanto en la playa como en el río Sinaloa, observándose un estado avanzado de deterioro a causa de la erosión que provoca dicha alteración antrópica.

Ante la situación inestable de la playa es evidente la necesidad de establecer medidas de restauración y recuperación de la misma; por tanto, se requiere un estudio detallado para comprender el grado de equilibrio que guarda y los procesos que intervienen en ella. En este sentido, el presente estudio se enfoca en proporcionar y analizar datos de oleaje, sedimento y morfología de la playa que, por un lado, permiten entender la relación entre el cambio temporal de la forma del perfil de la playa y la dinámica del oleaje que involucra transporte de sedimento y, por otro lado, proporcionar una base para estudios posteriores sobre su morfodinámica.

## **Metodología**

### **Adquisición y estadística de datos de oleaje**

La información del oleaje analizada en este trabajo corresponde al nodo PAC17MX, ubicado a 25° latitud norte y 109° longitud oeste del Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Dicho Atlas se generó utilizando el modelo de oleaje WAMC4 (*Wave Model*), con información meteorológica de las agencias *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), con el cual se generaron 44 años de información de oleaje en la región de aguas profundas a lo largo del litoral mexicano (del 1° de enero de 1958 al 31 de diciembre de 2001); los resultados que se obtuvieron se compararon y validaron con la información registrada por boyas direccionales del *National Data Buoy Center* (NDBC) (Montoya, 2016).

El análisis del oleaje se llevó a cabo previa clasificación de los datos por estación climática (verano, otoño, invierno y primavera). La Tabla 1 muestra los meses que se consideraron para definir cada estación climática, así como el número de datos que incluyeron.

**Tabla 1.** Meses considerados para definir las diferentes estaciones climáticas del año y el número de datos incluidos en cada una de las mismas.

Estación climática	Meses considerados	Núm. de datos
Verano	Junio-agosto	99 182
Otoño	Septiembre-noviembre	93 783
Invierno	Diciembre-febrero	89 789
Primavera	Marzo-mayo	97 006
<b>Total</b>		<b>379 760</b>

Para caracterizar el oleaje mediante su altura, periodo, dirección y frecuencia de ocurrencia se generaron rosas de oleaje de altura y periodo. Asimismo, se evaluaron los siguientes parámetros estadísticos del oleaje: altura media ( $\bar{H}$ ), periodo medio ( $\bar{T}$ ), dirección media ( $\bar{\theta}$ ) y los percentiles 50 ( $H_{50}$ ) y 100 ( $H_{100}$ ) de altura de ola.

## Refracción y someramiento del oleaje

Se aplicó el método de las ortogonales para calcular la transformación del oleaje por refracción y someramiento descrito en el Manual de Ingeniería Costera de la Armada de los Estados Unidos (Vincent, Demirbilek, & Weggel, 2002). Esto, con la finalidad de estimar en la región de aguas someras la magnitud de las alturas y orientación del oleaje al frente de la playa, a partir de la información del oleaje en aguas profundas del Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano.

La altura de la ola transformada en algún punto particular en aguas poco profundas ( $H_1$ ) se calcula como:

$$H_1 = H_0 \times K_s \times K_r$$

Donde  $H_0$  es la altura de ola en aguas profundas;  $K_s$ , el coeficiente de someramiento, y  $K_r$  es el coeficiente de refracción.

El coeficiente de someramiento,  $K_s$ , se calcula como:

$$K_s = \left( \frac{C_{go}}{C_{gl}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde  $C_{go}$  y  $C_{gl}$  son las celeridades de grupo de olas para aguas profundas y de transición, respectivamente, y se calculan como:

$$C_{go} = \frac{1}{2} \left( \frac{gT}{2\pi} \right)$$

y

$$C_{gl} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right] \left( \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \right)$$

Aquí,  $g$  es la gravedad;  $T$  denota el periodo de ola;  $L$  es la longitud de ola en una ubicación particular, y  $d$  representa la profundidad del agua.

Por otro lado, el coeficiente de refracción se calcula como:

$$K_r = \left( \frac{1 - \sin^2\theta_0}{1 - \sin^2\theta_1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Donde  $\theta_0$  es el ángulo de incidencia en aguas profundas (dirección de la ola);  $\theta_1$ , el ángulo de incidencia en un lugar en particular en aguas someras. Dado que el oleaje con ciertas aproximaciones cumple la Ley de Snell, se puede plantear que:

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_0}{C_0}$$

Aquí,  $C_1$  y  $C_0$  son la celeridad de la ola en aguas someras y profundas, respectivamente, y se calculan como:

$$C_1 = \frac{L}{T}$$

y

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi}$$

Por lo tanto, el ángulo de incidencia en un lugar en particular en aguas someras se calcula con la ecuación derivada de la Ley de Snell e igual a:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \frac{C_1 \times \sin \theta_0}{C_0} \right)$$

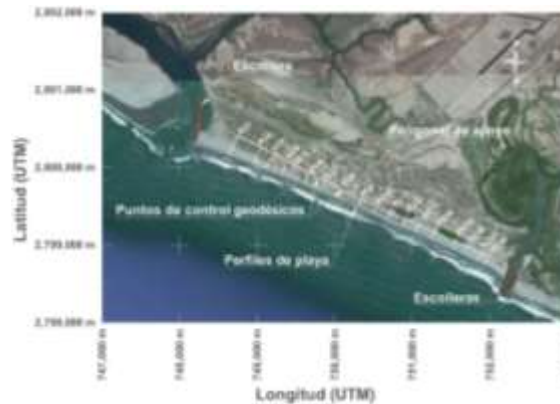
## Medición de perfiles de playa

Para la medición de los perfiles de playa se establecieron puntos de control geodésicos mediante mediciones satelitales en modo estático con receptores GPS de doble frecuencia para ligar los puntos topobatemétricos a la red geodésica nacional activa (RGNA) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), en particular al vértice de Culiacán.

De este modo se establecieron los puntos geodésicos de apoyo horizontal y vertical, con sus coordenadas geodésicas y UTM conocidas, así como su elevación sobre el nivel medio del mar (nmm), que permitió, mediante el seccionamiento transversal de la línea de costa, obtener la caracterización de los principales elementos que, de acuerdo con Carranza y Caso (1994), conforman el perfil de la playa.

Para lograr dicha caracterización se midieron las elevaciones del terreno natural a lo largo del perfil de la playa con distancias variables de entre 5 y 20 metros, en función de los cambios de pendiente del relieve, que va desde el límite superior en tierra de la playa hasta la zona de rompientes, por lo general durante marea baja para poder cubrir una mayor longitud de playa. Dichas mediciones se obtuvieron utilizando un taquímetro electrónico (estación total) y prismas con bastón, es decir, mediante taquimetría o nivelación trigonométrica, y no incluyen la parte del perfil de la playa que va más allá de la zona de rompientes en dirección hacia el mar.

La separación entre perfiles de playa sucesivos fue de unos 250 m, dando un total de 18 perfiles (Figura 2).



**Figura 2.** Ubicación de los perfiles de playa.

El procesamiento de la información obtenida tanto de las mediciones GPS como las taquimétricas se procesaron mediante métodos geodésicos y topográficos rigurosos en *software* especializado que posee una interfaz entre equipo y computadora para obtener la información de los puntos de control, y de las secciones transversales en el Sistema de Referencia Global ITRF2008 y en la proyección cartográfica *Universal Transverse Mercator* (UTM). Una vez obtenido el archivo digital de puntos, se procedió a realizar el dibujo cartográfico en los *software Autocad®*, *Civilcad®* y *Matlab®*, para obtener la línea de costa y los perfiles de playa.

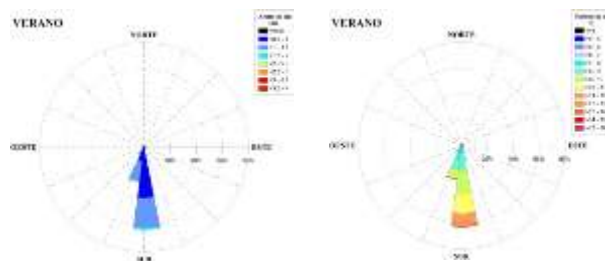
## Muestreo de sedimentos

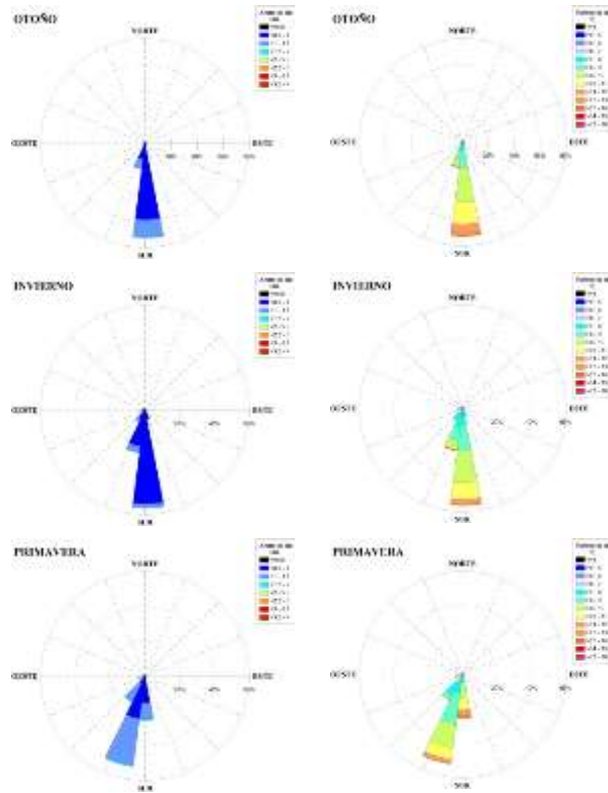
Se recolectaron muestras de sedimento a lo largo de los perfiles de playa de la Figura 2. Los elementos del perfil sobre los cuales se recolectaron fueron el límite superior de la playa (*berma* o *duna*), y las zonas de barrido y vaivén. Las muestras fueron de unos 2 kilogramos y se extrajeron de manera superficial. En total se recolectaron 198 muestras, y se realizaron de forma paralela a la medición de los perfiles.

Se efectuó la granulometría de cada muestra recolectada por el método mecánico de tamices. La selección del conjunto de tamices se realizó de manera que quedaran convenientemente espaciadas de acuerdo con la distribución de los tamaños de los sedimentos. Asimismo, se estimaron algunos parámetros texturales de los sedimentos, como tamaño promedio ( $D_m$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ), sesgo ( $SkI$ ) y curtosis ( $KG$ ).

## Resultados

De los datos de oleaje en aguas profundas se observó que en todas las estaciones del año las mayores frecuencias de ocurrencia corresponden a oleajes con alturas de ola dentro de los intervalos de 0.5 a 1.0 m y 1.0 a 1.5 m, con periodos comprendidos entre 6 y 12 s, provenientes principalmente del sur y suroeste  $22.5^\circ$  (figura 3). Asimismo, se estimaron para primavera y verano los mayores valores de  $\bar{H}$  y  $H_{50}$ , los cuales son bastante similares, mientras que los menores valores se estimaron para invierno (Tabla 2). No obstante, se estimó para otoño el mayor valor de  $H_{100}$  seguido de verano, primavera e invierno. Respecto a los valores estimados de  $\bar{T}$ , se observó que son bajos y mostraron poca variabilidad estacional.





**Figura 3.** Rosas de oleaje de altura y periodo por estación climática.

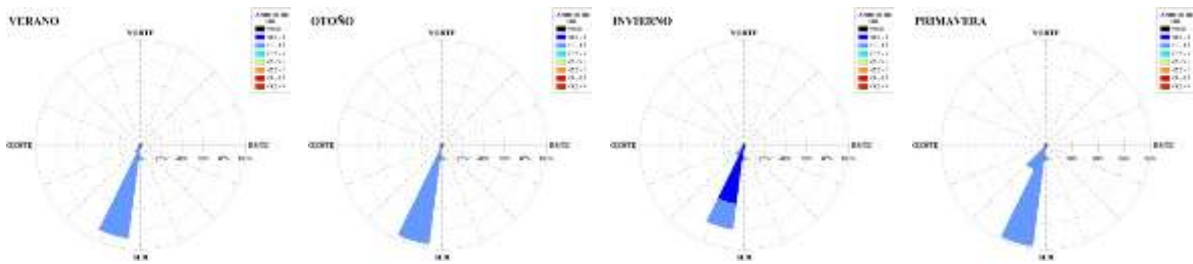
**Tabla 2.** Valores estimados de los parámetros estadísticos del oleaje en aguas profundas: altura media ( $\bar{H}$ ), periodo medio ( $\bar{T}$ ), dirección media ( $\bar{\theta}$ ) y los percentiles 50 ( $H_{50}$ ) y 100 ( $H_{100}$ ) de altura de ola.

Estación climática	$\bar{H}$ m	$H_{50}$ m	$H_{100}$ m	$\bar{T}$ s	$\bar{\theta}$ °
Verano	1.05	1.28	2.66	9.12	189.20
Otoño	0.93	1.09	3.02	9.30	186.18
Invierno	0.80	0.97	2.06	8.53	192.15
Primavera	1.07	1.30	2.25	8.81	203.00

Por otra parte, no se apreció a lo largo del año una diferencia considerable en el oleaje en aguas someras al frente de la playa en términos de su dirección de forma predominante; incide sobre la playa



de forma casi perpendicular (Figura 4, Tabla 3). En cuanto a su altura, igualmente se mostró bastante regular, en un rango de 1.0 a 1.5 m, excepto en invierno, donde las alturas son menores, del orden de 0.5 a 1.0 m.

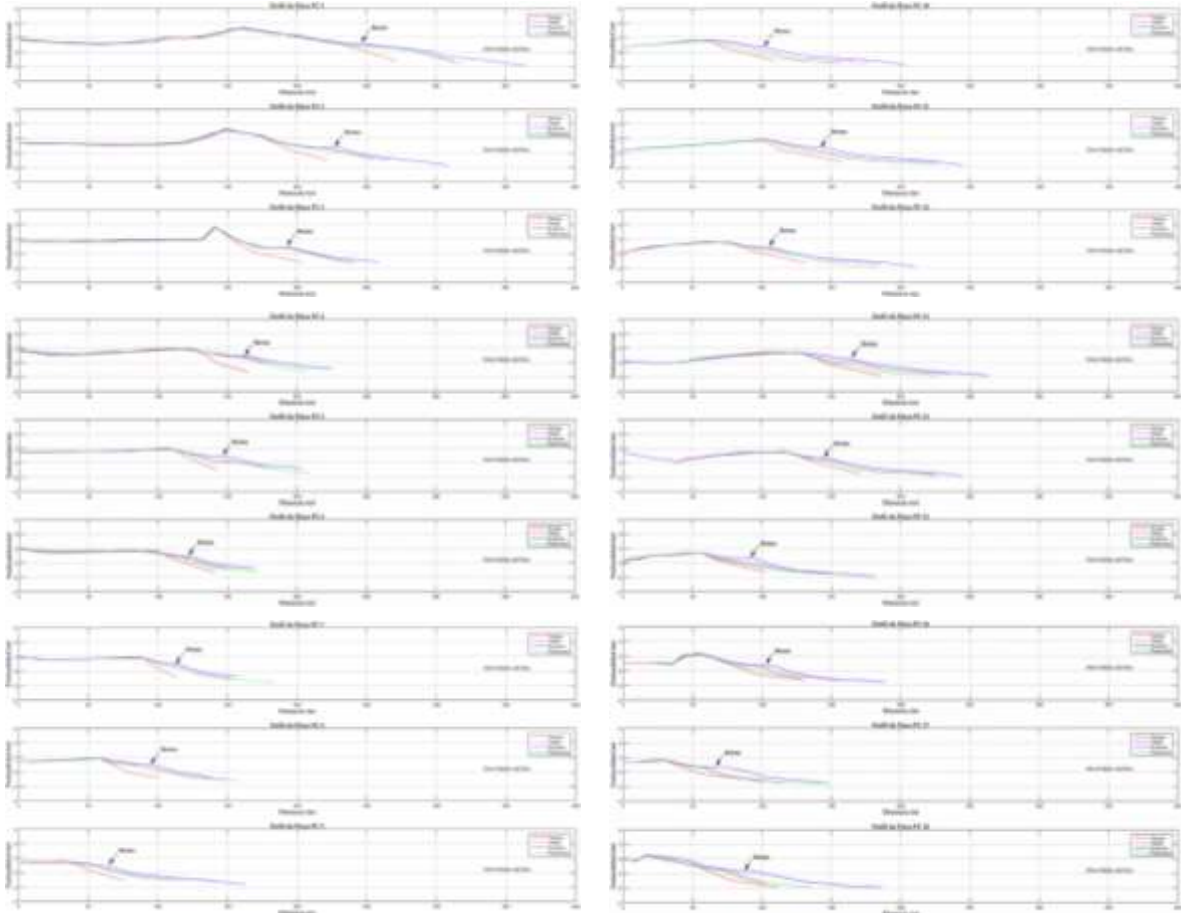


**Figura 4.** Rosas de oleaje afectado por la refracción y someramiento.

**Tabla 3.** Valores estimados de los parámetros estadísticos del oleaje transformado por refracción y someramiento: altura media ( $\overline{H}_R$ ) y dirección media ( $\overline{\theta}_R$ ).

Estación climática	$\overline{H}_R$ m	$\overline{\theta}_R$ °
Verano	1.32	198.94
Otoño	1.17	197.98
Invierno	0.97	199.68
Primavera	1.33	203.24

En cuanto al perfil de la playa, se encontró que en todos los puntos de control, las dos formas extremas de perfil son las de verano e invierno (Figura 5). En general, la forma de la pendiente del perfil de verano es más pronunciada y con cambios bruscos; en cambio, el perfil de invierno muestra una pendiente suave más o menos continua; asimismo, se puede apreciar la formación de una berma.



**Figura 5.** Perfiles de playa de los 18 puntos de control medidos trimestralmente a partir de agosto (verano) de 2015 hasta mayo (primavera) de 2016.

Respecto a los parámetros texturales de los sedimentos, no variaron de modo significativo a lo largo de la playa ni entre las estaciones climáticas (Tabla 4). En promedio mostraron en unidades Phi ( $\phi$ ) un tamaño de  $2.477 \phi$ , desviación estándar de  $0.134 \phi$ , asimetría de  $-0.145 \phi$  y curtosis de  $1.364 \phi$ .

**Tabla 4.** Valores estimados de los parámetros texturales de los sedimentos en unidades Phi ( $\phi$ ): tamaño medio ( $D_m$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ), sesgo ( $SkI$ ) y curtosis ( $KG$ ).

Estación	$D_m$	$\sigma$	Skl	KG
Verano	2.453	0.128	-0.163	1.321
Otoño	2.473	0.136	-0.142	1.399
Invierno	2.455	0.132	-0.115	1.344
Primavera	2.520	0.138	-0.159	1.391

## Discusión

La estacionalidad del régimen del oleaje se ve reflejada en los cambios del perfil de la playa (figura 5), pues no es el mismo a lo largo del año. Los valores estimados de los parámetros estadísticos del oleaje (Tabla 4) indican que en otoño la altura de las olas comienza a disminuir, en comparación con los observados en verano, hasta alcanzar el oleaje de invierno; en tanto que en primavera aumenta la altura de las olas y se mantienen similares hasta verano. Tal comportamiento provoca que el perfil de la playa se acreciente de otoño a invierno, cuando el oleaje disminuye su altura hasta alcanzar en promedio valores bajos, y se erosione de primavera hasta verano, cuando el oleaje es de mayor altura y consistente. Estos cambios en el perfil de la playa ocurrieron prácticamente en todos los puntos de control a lo largo de la misma, los cuales guardan gran semejanza con los reportados por Alcántar (2007). Sin embargo, el ciclo interanual de cambio del perfil de playa de Las Glorias, que se compone de las fases de erosión y acreción, que se presentan en primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente, no se muestra invertido, como lo señala Alcántar (2007), porque los cambios en la morfología del perfil de playa responden a los cambios en las condiciones del oleaje (Masselink & Hughes, 2003); es decir, oleaje de alta energía produce erosión y oleaje de baja energía acreción, tal y como se verificó en este trabajo.

El oleaje por efecto de la refracción y someramiento tiende a regularizarse al frente de la playa en términos de su dirección y altura

(Figura 4). No obstante, los oleajes de mayor altura dominan en primavera y verano; mientras que los de menor altura, en otoño e invierno (cuadro 5). Como el oleaje tiende a incidir, sobre todo de forma casi perpendicular sobre la playa en todas las estaciones climáticas del año, poco transporte de sedimento ocurre en sentido longitudinal a la playa; más bien, el transporte de sedimento es en sentido transversal, es decir, el oleaje de mayor altura erosiona la berma y tiende a depositar el sedimento al frente de la playa en forma de barra, que después es removido hacia la playa por el oleaje de menor altura para formar una nueva berma.

En relación con los parámetros texturales de los sedimentos, dado que éstos no variaron de forma significativa a lo largo de la playa ni entre las estaciones climáticas, su distribución es espacial y temporalmente muy homogénea. Teniendo en cuenta los valores límites de los parámetros texturales descrito en el Manual de Ingeniería Costera de la Armada de los Estados Unidos (King & Galvin, 2002), los sedimentos están constituidos por arena fina, muy bien clasificada, asimétrico hacia los tamaños gruesos y leptocúrtico. La homogeneidad del tipo de sedimento sugiere que éste tiene influencia relativa menor que el oleaje en los cambios del perfil de la playa.

## Conclusiones

Los oleajes de mayor altura dominan en primavera y verano, mientras que los de menor altura en otoño e invierno. Sin embargo, en otoño se presentan las olas de mayor altura en el año; siendo ésta una condición en la que la playa puede cambiar su perfil en muy poco tiempo.

Los perfiles de playa presentan cambios morfológicos, con una marcada estacionalidad, donde se observa que la máxima acreción es en invierno y la máxima erosión en verano; con esto se verifica que el ciclo

interanual de cambio del perfil de playa responde al régimen estacional del oleaje.

La presencia de una berma es típica de invierno y la pendiente de la playa en su conjunto resulta ser menor que en las otras estaciones climáticas; por el contrario, la ausencia de berma y la mayor pendiente de la playa resultan típicas de verano.

La distribución del sedimento que compone a la playa es espacial y temporalmente muy homogénea; predominan las arenas finas.

### Agradecimientos

Se agradece al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por la entrega de los datos de oleaje que se utilizaron para la elaboración de este trabajo.

### Referencias

- Alcántar, R. (2007). *Variabilidad espacio temporal del perfil de playa, en playa Las Glorias en Guasave, Sinaloa* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Guasave, Sinaloa, México.
- Carranza, E., & Caso, M. (1994). Zonificación del perfil de playa. *Revista Geo-UNAM*, 2, 26-32.
- Davies, L. (1964). A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8, 27-42.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de Sinaloa. Recuperado de [http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo\\_siglo21/serie\\_lib/modific\\_al\\_sis.pdf](http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf)
- King, D., & Galvin C. (2002). Coastal sediment properties (III-1-1-III-1-41). In: *Coastal Engineering Manual*. Washington, DC, USA: U.S. Army Corps of Engineers. Recovered from <https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/>

EngineerManuals/EM\_1110-2-1100\_Part-03.pdf?ver=2014-03-10-134006-163

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Red Geodésica Nacional Activa*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/coordenadas2010.aspx>
- Limón, J. (2010). *Manifestación de impacto ambiental, modalidad particular para el proyecto de: escolleras, protección marginal playera y dragado del canal de acceso en la Bocanita, municipio de Guasave, Sinaloa*. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/sin/estudios/2010/25SI2010H0009.pdf>
- Montoya, M. (2016). Red Nacional de Datos Oceanográficos para Zonas Costeras. *Revista IC Ingeniería Civil*, 566, 14-18. Recuperado de [https://issuu.com/helios\\_comunicacion/docs/ic-566\\_ok/16](https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/ic-566_ok/16).
- Vincent, L., Demirbilek, Z., & Weggel, R. (2002). Estimation of nearshore waves (II-3-1-II-3-41). *Coastal Engineering Manual*. Washington, DC, USA: U.S. Army Corps of Engineers. Recovered from [http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_1110-2-1100\\_Part-02.pdf?ver=2016-02-11-153511-290](http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1100_Part-02.pdf?ver=2016-02-11-153511-290)
- SMN, Servicio Mareográfico Nacional. (2018). *Servicio Mareográfico Nacional*. Ciudad de México, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=tiposMarea>
- Masselink, G., & Hughes, M. (2003). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. London, UK: Hodder Education.
- Zayas, E. (2010). *Efectos en playas Las Glorias causados por la construcción del espigón al modificar el transporte litoral* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Guasave, Sinaloa, México.

## **Análisis de declinación de la producción para la caracterización de yacimientos**

### **Analysis of production decline for reservoir characterization**

Alfonso Aragón-Aguilar<sup>1</sup>  
Víctor Arellano-Gómez<sup>2</sup>  
Rosa María Barragán-Reyes<sup>3</sup>  
Pedro Guido-Aldana<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Morelos, México, [aaragon@ineel.mx](mailto:aaragon@ineel.mx), ORCID: 0000-0002-5375-6181.

<sup>2</sup>Fallecido en enero de 2016

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Morelos, México, [rmbreyes@hotmail.com](mailto:rmbreyes@hotmail.com)

<sup>4</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, [pedroguido@tlaloc.imta.mx](mailto:pedroguido@tlaloc.imta.mx), ORCID: 0000-0002-9711-4228.

Autor para correspondencia: Alfonso Aragón-Aguilar, [aaragon@ineel.mx](mailto:aaragon@ineel.mx)

### **Resumen**

En este trabajo se presenta el modelo numérico de análisis de declinación de la producción utilizado en sistemas petroleros y su adaptación para ser aplicado en sistemas geotérmicos e hidráulicos. Se muestra la importancia de caracterizar la producción de los pozos durante su etapa de explotación continua, por la información útil que aporta, la cual se aplica de manera práctica a sus diseños de explotación. Se demuestra la aplicabilidad de los métodos de análisis de declinación de la producción por medio analítico y a través del ajuste de curvas tipo. Los resultados obtenidos son los ritmos de declinación, y las propiedades físicas de la formación (permeabilidad, porosidad, factor de

daño, radio de drene). Estableciendo los límites económicos de producción, con la metodología utilizada en este trabajo, se puede estimar la vida útil remanente del pozo y su reserva factible de ser extraída. Las técnicas expuestas permiten caracterizar de modo confiable la producción de los pozos de petróleo, geotérmicos e hidráulicos, con el objeto de mantener o modificar sus diseños de explotación comercial o sustentar planes de expansión. Se demuestra que el uso de más de una metodología de análisis ayuda a verificar la certidumbre de los resultados.

**Palabras clave:** caracterización de la producción, análisis de declinación, ritmo de declinación, límite económico de producción, vida útil, reserva remanente, permeabilidad, almacenaje de la formación, índice de transmisividad.

### **Abstract**

Two of the numerical models used for the analysis of production declining data in oil wells which have been adapted to geothermal and water wells conditions are presented in this work. Important information, which is useful to design optimal exploitation strategies, is usually obtained from production monitoring data obtained during continuous exploitation of wells. The methods for the analysis of production declining in wells are based either on analytical approaches or on type curves technique. The results include both the declining rates of wells and the physical properties of the formation (permeability, porosity, damage factor, drainage radius, etc. among others). With the used methodologies and taking into account the economic limit established for the production, the remaining useful life and the reserves feasible to be extracted can also be estimated. The use of this methodology allows a reliable characterization of the production of geothermal wells in order to make decisions on their commercial exploitation. It has been demonstrated in this work that the use of more than one methodology helps to verify the certainty of the developed analyses.

**Keywords:** Production characterization, decline analysis, decline rate, economic production limit, useful life, remaining reserves, permeability, formation storage, transmissivity index.



Recibido: 03/08/2015

Aceptado: 09/08/2018

## Introducción

Cualquier tipo de pozo (petrolero, geotérmico o hidráulico) tiene como objetivo principal lograr una producción rentable. La medida de su eficiencia es su índice de productividad, el cual evoluciona en función del tiempo de explotación. De manera ordinaria, las características productivas de los pozos declinan con su tiempo de vida operativa, lo cual es un factor de influencia en la modificación de sus diseños de explotación. La declinación típica que se presenta en un pozo se identifica por la sensible tendencia de disminución en su producción hasta que al final alcanza un límite económico no sostenible.

La declinación está influenciada por el tipo de sistema. Así, los sistemas cerrados, como los yacimientos de petróleo y los acuíferos confinados, presentan declinaciones mayores que los yacimientos con entrada de recarga.

Es común encontrar que en los acuíferos y yacimientos geotérmicos exista entrada de agua de recarga, lo cual influye en menores ritmos de declinación. Las técnicas directas para identificar la declinación de la productividad de los pozos se basan en el comportamiento de sus parámetros de producción.

En pozos de petróleo, se estudia el comportamiento de parámetros, como presión, flujo, relación aceite/gas, viscosidad y densidad del fluido, entre otros, para evaluar su rendimiento. El comportamiento de la productividad en pozos geotérmicos tiene como parámetros indicadores: presión, flujo, entalpía, relación agua/vapor, variaciones de la composición química del fluido producido y sus gases asociados. En pozos de agua, los parámetros indicadores son flujo, presión de bombeo y variación del nivel piezométrico, entre otros.

La declinación de los pozos es una función dependiente de las características petrofísicas del yacimiento y de su ritmo de explotación. Por lo anterior, resulta importante tener un conocimiento integral sobre la caracterización de los pozos desde el inicio y a lo largo de su vida productiva.

Debido a que durante la etapa de explotación comercial los pozos productores están integrados a los sistemas operativos resulta costoso su retiro para someterlos a cualquier tipo de estudio. Por tal razón, en este trabajo se consideró oportuno usar las mediciones de producción que se hacen a los pozos de manera rutinaria durante su etapa operativa, como base para estudiar su rendimiento. Esta técnica resulta eficiente, porque los pozos, al estar operando continuamente, alcanzan un estado pseudoestable, por lo cual, a partir de la correlación de sus comportamientos particulares, se pueden vincular con la respuesta del mismo yacimiento al efecto de la explotación.

Tomando en consideración que la declinación de la producción es un efecto natural de la explotación, los análisis relacionados con este efecto permiten inferir tendencias futuras del comportamiento de los pozos. Además, teniendo en cuenta los límites económicos establecidos para cada pozo se pueden determinar su tiempo de vida útil, capacidad total de producción y reserva remanente.

Los objetivos de este trabajo son: a) la aplicación de la metodología de los análisis de declinación a historias de producción en pozos que han superado los efectos transitorios y; b) la caracterización del yacimiento en la que se incluye la vida útil, masa total extraíble y reserva remanente.

## **Antecedentes**

La técnica de análisis de declinación de la producción usando expresiones matemáticas fue introducida por Arps (1945). Su exitosa aplicación se fundamenta en que aún se sigue utilizando. En su análisis, Arps estableció los tipos de declinación exponencial, armónico e

hiperbólico. Fetkovich (1980), y Fetkovich, Fetkovich y Fetkovich (1994) ampliaron el uso de las curvas tipo a los análisis de los datos de producción. Ellos combinaron de manera teórica las respuestas de un pozo en un yacimiento cerrado con la técnica clásica de curvas de declinación. Sanyal, Menzies, Brown, Eney y Eney (1989) efectuaron análisis de declinación a partir de mediciones de producción introduciendo la técnica de normalización de flujo. Métodos modernos de análisis de declinación de la producción (Blasingame, McCray, & Lee, 1991; Agarwal, Gardner, Kleinsteiber, & Fussel, 1999) muestran el uso combinado de curvas tipo y los conceptos de análisis de declinación.

Una técnica completa de análisis de la producción en campos maduros fue introducida por Gaskari, Mohagheghi y Jalali (2006). Resultados de análisis de declinación orientados a la caracterización de yacimientos fueron presentados por Mata, Gaskari y Mohagheghi (2007). El análisis de curvas de declinación usando redes neuronales fue desarrollado por Cárcamo y Polo (2007). Las técnicas de análisis de los datos de producción aplicadas para predecir el comportamiento de los pozos de gas fueron desarrolladas por Bahadori (2012). Diferentes metodologías para analizar la declinación en yacimientos geotérmicos son discutidas por Aragón-Aguilar, Barragán y Arellano (2013).

Debido a la dificultad que representa tomar registros de fondo con el pozo fluyendo, en este trabajo se usan sólo mediciones de superficie (presión y flujo a condiciones de cabezal del pozo). Las consideraciones teóricas para asumir las mediciones de superficie como representativas del yacimiento son: 1) La masa producida es la misma a condiciones de fondo que en la superficie, lo que cambia es su calidad; 2) la presión de yacimiento ( $p_e$ ) que se utiliza para determinar las propiedades de la formación se determina a partir de simuladores de pozo. Para determinar las condiciones de fondo se usó el programa *WELLSIM* (Gunn & Fresston, 1991), que es un simulador de flujo en pozos.

## Conceptualización teórica

La declinación típica que presenta un pozo se determina a partir de una rápida disminución en su producción hasta que finalmente se alcanza un límite de producción que ya no es rentable. Al alcanzar dichas condiciones, los pozos llegan a ser clasificados como marginales. La forma de la tendencia de la curva de producción ordinariamente se ve afectada por factores externos, como:

- Restricción artificial de la descarga de producción del pozo por baja demanda del mercado o por regulaciones de la administración del campo. Lo anterior reduce la forma de la curva de producción, pero no cambia de forma significativa la producción total del pozo.
- Fracturamiento hidráulico o estimulación química para incrementar de manera rápida la producción y, por consecuencia, aumentar las reservas recuperables de un pozo.
- El campo puede ser sometido a un proyecto de recuperación secundaria o terciaria.

La compartimentación es una de las características principales que están surgiendo en la explotación de yacimientos de petróleo, al poder convertir un yacimiento relativamente grande y continuo en compartimentos que se comportan como un grupo de pequeños yacimientos (Shahamat, Hamdi, Mattar, & Aguilera, 2016). En yacimientos geotérmicos se ha encontrado que cada compartimento está relacionado con los radios de drenado ( $r_e$ ) de cada pozo. De esta manera se identifican tendencias particulares en su declinación y su correlación con pozos vecinos, que permiten estimar la tendencia general del yacimiento. Las ecuaciones para determinar el gasto inicial ( $q_i$ ) y el ritmo de declinación ( $D$ ) fueron inicialmente propuestos por Arps (1945):

$$q_i = \frac{k h (p_i - p_{wf})}{141.2 \mu B \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_{wa}} \right) - 0.5 \right]} \quad (1)$$

Donde:

$q_i$  = flujo inicial en  $b/d$ .

$k$  = permeabilidad de la formación en  $mD$ .

$h$  = espesor útil de producción en pies.

$p_i$  = presión inicial en  $lb/pg^2$ .

$p_{wf}$  = presión de fondo fluyendo en  $lb/pg^2$ .

$\mu$  = viscosidad absoluta del fluido en  $cp$ .

$r_e$  = radio de drenado del yacimiento en pies.

$r_{wa}$  = radio aparente del pozo en pies determinado por medio de  $r_{wa} = r_w e^{-s}$ , donde:

$s$  = efecto de daño en la formación, provocada por obstrucciones que influyen en la disminución de la permeabilidad y que repercuten en la productividad.

$B$  = factor de volumen del fluido, el cual relaciona su volumen con condiciones de superficie respecto de las condiciones de fondo ( $pie^3_{@c.s.}/pie^3_{@c.y.}$ ); por tanto, es adimensional.

La disminución del flujo por efecto de la explotación se identifica con el ritmo de declinación ( $D$ ), el cual se determina a través de la ecuación (2) (Arps, 1945):

$$D = \frac{2(0.000264)k}{\phi \mu C_t (r_e^2 - r_{wa}^2)} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_{wa}} \right) - 0.5 \right] \quad (2)$$

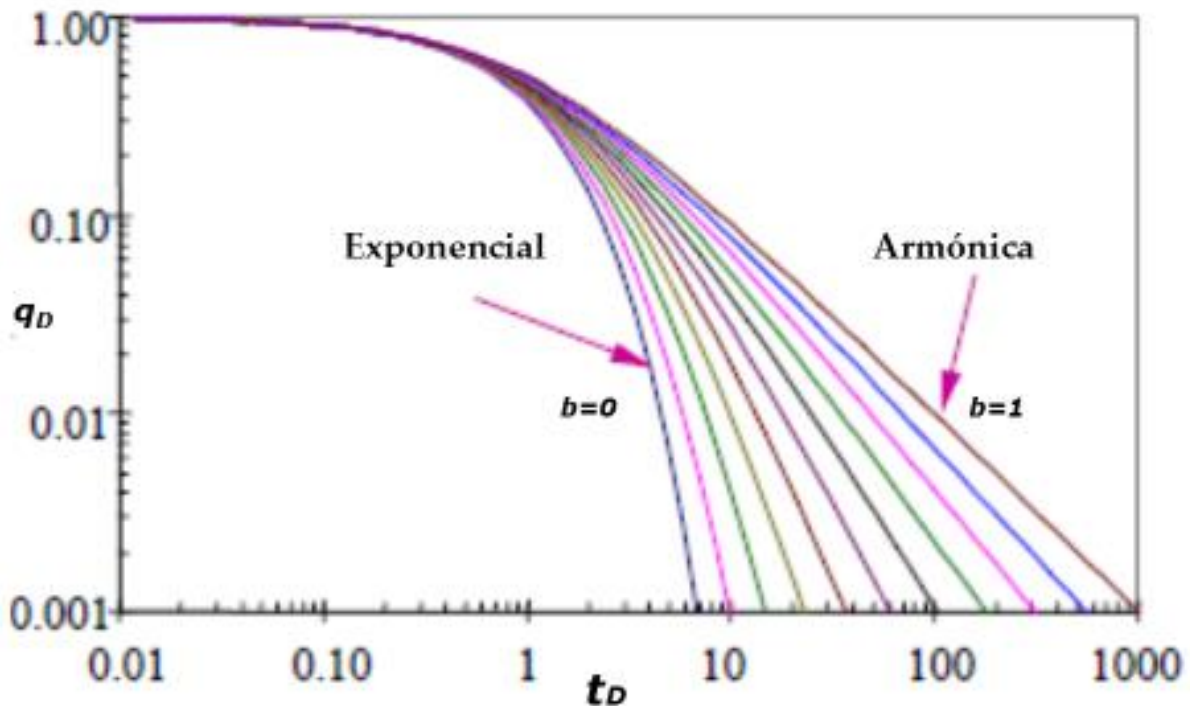
Donde  $D$  es el ritmo de declinación en  $(b/d)/mes$ ;  $\phi$ , la porosidad expresada en fracción;  $C_t$ , la compresibilidad total del sistema en  $1/(lb/pg^2)$ . Las restantes variables permanecen como fueron definidas antes.

La ecuación (3) es la expresión clásica de la declinación, propuesta por Arps (1945), la cual se utiliza para calcular el flujo ( $q$ ) para cualquier tiempo ( $t$ ):

$$q = q_i e^{-bt} \quad (3)$$

Donde  $q$  es el flujo en  $b/d$ ,  $t$  es el tiempo en meses y  $b$  es la constante exponencial de declinación de las ecuaciones de Arps (1945) y Fetkovich

(1980). La Figura 1 muestra la curva tipo (Fetkovich, 1980), construida a partir del sistema de ecuaciones de Arps (1956).



**Figura 1.** Curva tipo para análisis de declinación de la producción, obtenida a partir de las ecuaciones de Arps (1945).

Tomando la ecuación (3), se tiene que para  $b = 0$  ( $n = 0$  en la Figura 1), la declinación es de tipo exponencial. Para  $b = 1$  ( $n = 1$  en la Figura 1), la declinación es de tipo armónica. Ambos tipos de declinación son los límites de la curva tipo. Mientras que para los casos en que  $0 < b < 1$  se tiene la declinación tipo hiperbólica.

Por otra parte, la ecuación para determinar la producción acumulada ( $N_p$ ) en barriles puede expresarse de la siguiente forma (Arps, 1956):

$$N_p = \frac{q_i}{D} (\log q_i - \log q) \quad (4)$$

Las variables de la ecuación (4) conservan el mismo significado en el que ya fueron definidas. Es factible representar la ecuación anterior por medio de una línea recta, graficando el logaritmo de flujo contra el gasto producido acumulado. La declinación durante el periodo transitorio depende sobre todo de las características de la formación en la cercanía del pozo. Es importante resaltar que el radio aparente del pozo ( $r_{wa}$ ) es utilizado para la determinación de las propiedades de la formación. Además, las curvas tipo de declinación tienen aplicación general para pozos con factor de daño ( $s$ ) tanto positivo como negativo. Las expresiones de los parámetros adimensionales que se utilizan en la curva tipo para el análisis de declinación son las siguientes.

Para el gasto adimensional:

$$q_D = \frac{q(t)}{q_i} \quad (5)$$

Donde:

$q_D$  = flujo adimensional (representa el conjunto de valores del eje de las ordenadas en la curva-tipo).

$q(t)$  = valor del flujo volumétrico al tiempo ( $t$ ).

El tiempo adimensional se expresa como:

$$t_D = D_i t \quad (6)$$

Donde:

$t_D$  = tiempo adimensional (representa el conjunto de valores del eje de las abscisas en la curva-tipo).

Sustituyendo el valor de  $q_D$ , obtenido en la ecuación (5), en la ecuación (7) se puede obtener la permeabilidad ( $k$ ):

$$q_D = \frac{141.2 q \mu B}{kh(p_i - p_{wf})} \quad (7)$$

Las ecuaciones (8) y (10) se utilizan para determinar las propiedades del yacimiento, permeabilidad ( $k$ ) y porosidad ( $\phi$ ), a partir del gasto y tiempo adimensionales, respectivamente:

$$k = \frac{141.2 q \mu B}{q_D h (p_i - p_{wf})} \quad (8)$$

Sin embargo, debido a que por la naturaleza volcánica de los sistemas geotérmicos no se tiene definido con claridad un espesor del yacimiento ( $h$ ), y la viscosidad del fluido ( $\mu$ ) varía de acuerdo con los procesos de ebullición dentro del yacimiento, es una práctica común determinar la transmisividad ( $kh/\mu$ ):

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{141.2 q B}{q_D h (p_i - p_{wf})} \quad (9)$$

Sustituyendo el tiempo adimensional ( $t_D$  de la ecuación (6)), en la ecuación (10), se puede determinar la porosidad  $\phi$  que se muestra en la ecuación (11):

$$t_D = \frac{0.0063 kt}{\phi \mu C_t r_{wa}^2} \quad (10)$$

$$\phi = \frac{0.0063 kt}{t_D \mu C_t r_{wa}^2} \quad (11)$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación (11) por la variable  $h$  se obtiene la agrupación de términos; por una parte, la transmisividad ( $kh/\mu$ ), determinada en la ecuación (9) y, por otro, el almacenaje  $\phi C_t h$ , que es el mismo que se usa en las pruebas de descarga de ingeniería hidráulica:



$$\varphi C_t h = \frac{0.0063 t}{t_D \varphi r_{wa}^2} \left[ \frac{kh}{\mu} \right] \quad (12)$$

La incertidumbre en torno a las variables  $h$  y  $\mu$  conduce a determinar un valor directo de permeabilidad  $k$  en la ecuación (8) o índices relacionados con el arreglo de las distintas variables ( $kh$ ;  $k/\mu$ ). En la Tabla 1 se muestran los índices de la formación que se pueden determinar en función del conocimiento de estas variables de incertidumbre.

**Tabla 1.** Índices relacionados con la permeabilidad de la formación que se pueden obtener de acuerdo con el conocimiento de las variables  $h$  y  $\mu$ , usando la ecuación de flujo adimensional en las curvas tipo.

Espesor ( $h$ )	Viscosidad ( $\mu$ )	Determinación	Nombre
Valor conocido	Valor conocido	$k$	Permeabilidad
Valor conocido	Valor desconocido	$k/\mu$	Índice de movilidad
Valor desconocido	Valor conocido	$kh$	Índice de capacidad
Valor desconocido	Valor desconocido	$kh/\mu$	Índice de transmisividad

Los primeros métodos de análisis aplicados para yacimientos que utilizaron la técnica de curvas-tipo fueron para el análisis de las pruebas de presión (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey 1970; Earlouger & Kersh, 1974). Usando la misma analogía, el método de superposición de Slider (1983) tiene similar procedimiento al de ajuste de curvas tipo ( $\log - \log$ ) aplicadas para analizar datos de incremento y decremento de presión a gasto constante.

Una aproximación simplificada para la determinación de la entrada de agua para sistemas finitos que ha proporcionado resultados que se comparan de modo favorable con las más rigurosas soluciones analíticas a presión-constante es la propuesta por Fetkovich (1973).

$$q(t) = \frac{J(p_i - p_{wf})}{e^{\left[ \frac{(q_i)_{max}}{Np_i} \right] t}} \quad (13)$$

Donde:

$(q_i)_{max}$  = máximo flujo volumétrico inicial

$J$  = índice de productividad en  $(b/d)/bar$ , que es la relación entre el flujo volumétrico ( $q$ ) y la caída de presión.

Esto es:

$$J = q/\Delta p \quad (14)$$

donde  $\Delta p = p_i - p_{wf}$

$$q_i = J (p_i - p_{wf}) \quad (15)$$

Teniendo en consideración que a condiciones iniciales no se tiene caída de presión, el índice de productividad a condiciones iniciales se obtiene a partir de:

$$J = \frac{(q_i)_{max}}{p_i} \quad (16)$$

Sustituyendo la ecuación (16) dentro de la ecuación (15) se obtiene:

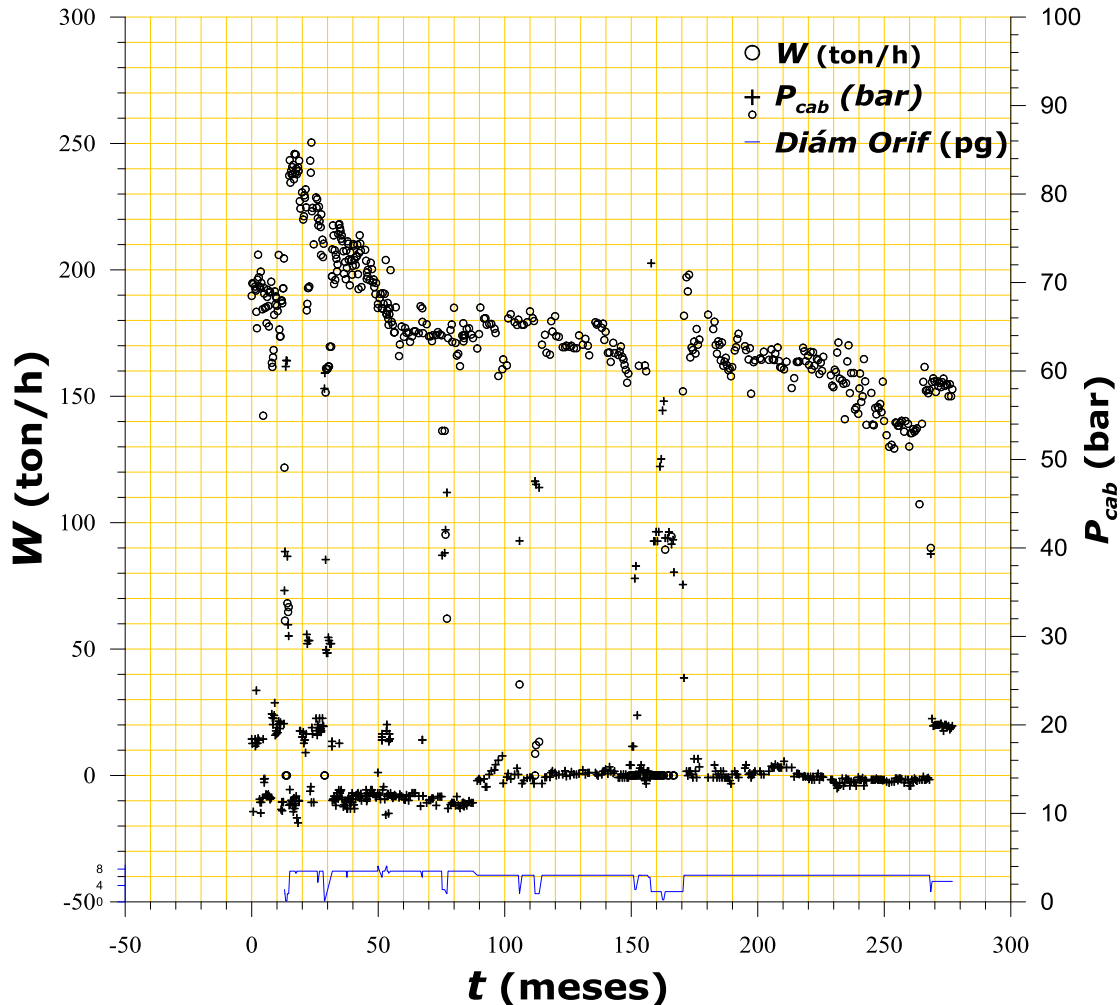
$$(q_i)_{\text{máx}} = \frac{q_i}{\left[1 - \frac{p_{wf}}{p_i}\right]} \quad (17)$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones (15) y (17) dentro de la ecuación (13) se obtiene:

$$\frac{q(t)}{q_i} = e^{-\left[\frac{q_i t}{\left(1 - \frac{p_{wf}}{p_i}\right) N p_i}\right]} \quad (18)$$

Que se puede considerar como una derivación de la ecuación de declinación exponencial, en términos de las variables del yacimiento bajo presión constante.

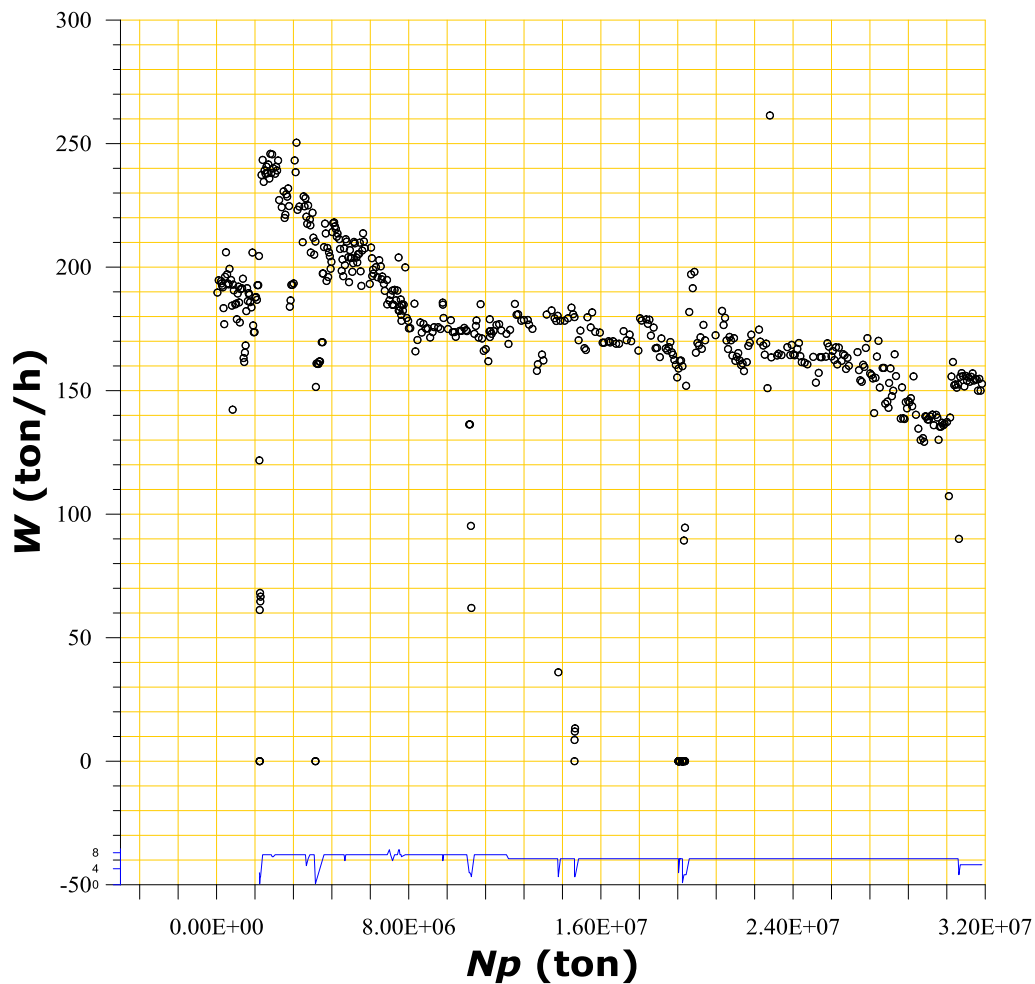
Al inicio de un análisis de declinación es recomendable hacer un diagnóstico general del comportamiento de la historia de producción. En la Figura 2 se muestra una curva típica de producción, presión de cabezal y orificio de descarga contra el tiempo (Aragón-Aguilar *et al.*, 2013). La sección final de la gráfica se puede ajustar a una forma (matemática) regular y extrapolarla a tiempo futuro, y de esta manera predecir la producción del pozo, por ejemplo, a 1, 2, 5, 10 o más años.



**Figura 2.** Gráfica típica de gasto de flujo másico y presión de cabezal contra tiempo.

La gráfica de gasto de producción contra el tiempo permite identificar que el gasto declina en función del tiempo de explotación. Como una gráfica auxiliar se añade la correspondiente a los cambios en los orificios de apertura en la producción del pozo. Al observar la variación en los diámetros de apertura y su relación con los parámetros de producción (presión, flujo), se puede identificar la sensibilidad y dependencia entre éstos. El caso que sobresale es para el intervalo de tiempo entre 250 y 265 meses, observándose que la reducción en el orificio influye tanto en la disminución del flujo como en el correspondiente incremento de presión.

Además, al construir una gráfica con los datos de producción del pozo contra su producción acumulada de masa extraída, se puede observar que la parte de la curva que declina se puede convertir en una línea recta, la cual puede ser fácilmente extrapolable, tal como se muestra en la Figura 3. Es importante anotar que en la gráfica de la Figura 3 se pueden identificar dos estados de evolución en la declinación: el transitorio (en la etapa inicial de explotación) y el pseudoestabilizado. Como se podrá observar, cuando se presenta el cambio de pendiente en la gráfica de la Figura 2 no existe variación en el diámetro del orificio, por lo cual se asume la presencia de una respuesta real del yacimiento.



**Figura 3.** Representación del comportamiento de la masa producida acumulada como una función de la producción másica del pozo.

## Aplicaciones a casos prácticos de campo

Con el objeto de demostrar la aplicación práctica de la teoría de análisis de declinación se utilizaron datos de producción de un pozo de petróleo, uno geotérmico y uno de agua. A continuación se muestran las aplicaciones a dichos casos:

### Pozo de petróleo

Un pozo de petróleo produce en una zona de baja permeabilidad, con una presión de fondo fluyendo de  $800 \text{ lb}/(\text{pg}^2)_{abs}$  (55.15 Bar). Los datos medidos de la declinación del gasto en el pozo se enlistan en la Tabla 2. Los datos del pozo y los resultados de una prueba de incremento de presión se ilustran en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Declinación del gasto del pozo bajo una  $p_{wf}$  constante de  $800 \text{ (lb/pg}^2)_{abs}$ .

$t$ (meses)	$q$ (b/d)	$q$ (lt/h)
6	619.3	4 102.8
18	512.9	3 397.9
28.8	436.4	2 891.2
42	381.4	2 526.8
52.8	331.5	2 196.2
66	264.4	1 751.7

75.6	250.6	1 660.2
90	234.9	1 556.2
102	234.9	1 556.2
114	189.4	1 254.8
126	170.0	1 126.2
138	152.7	1 011.6
150	137.1	908.3

**Tabla 3.** Datos característicos de la formación en el entorno del pozo.

Parámetros	Valor	Unidad
$Bo_i$	1.36	
$C_t$	1.09E-6	$1/(\text{lb/pg}^2)_{\text{abs}}$
$k$	0.392	mD
$h$	121	pie
$p_i$	5790	$(\text{lb/pg}^2)_{\text{abs}}$
$p_{wf}$	800	$(\text{lb/pg}^2)_{\text{abs}}$
$r_w$	0.25	Pie
$r_e$	1490	Pie (160 acres de espaciám.)
$s$	-3.85	Para $r_{wa} = 11.75$
$\phi$	0.101	
$\mu_{oi}$	0.46	cp

Dentro de un estudio completo de producción del pozo se determinan las siguientes características:

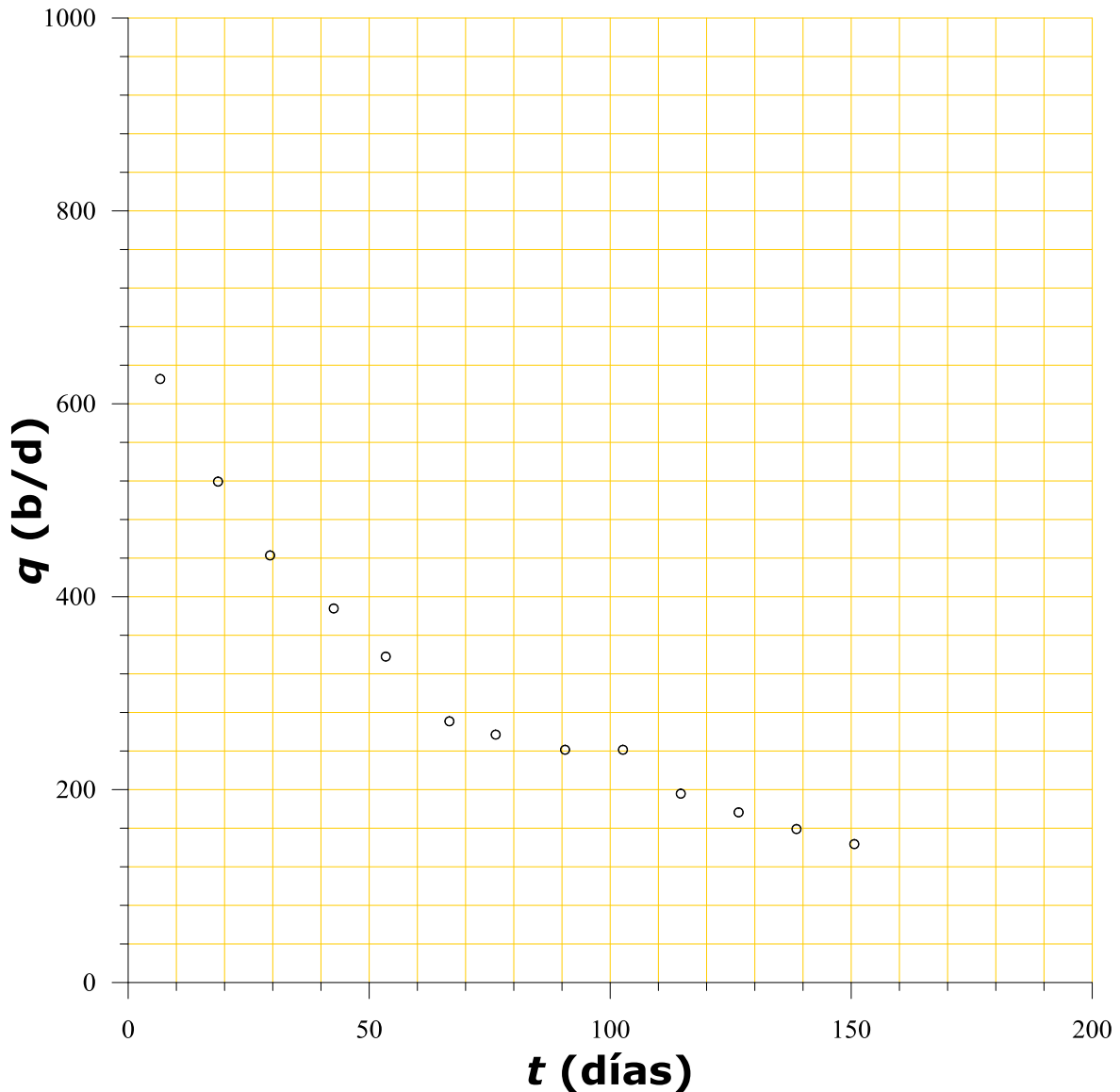
- El modelo de declinación de la producción en el pozo extrapolándolo hasta el punto en donde el flujo llega a 10 (b/día) (unos 66.25 l/h), como límite crítico económico.
- Utilizando los datos de declinación se calculan  $q_i$  y  $D$ . Después, empleando la ecuación de declinación de Arps (1945), se determina  $q$ .

- Se comparan los valores calculados de  $q_i$  y  $D$  del punto 2 con los valores determinados con las ecuaciones (1) y (2), empleando los resultados de una prueba de incremento de presión.

Al inicio, para tener una caracterización completa de la prueba, es muy útil una gráfica de flujo contra tiempo (Figura 4), la cual se puede utilizar como auxiliar para el diagnóstico general. Después de efectuar una conceptualización general de la prueba, se identifica el modelo de declinación del flujo, para lo cual se emplean dos métodos gráficos:

- Curva tipo elaborada en papel *log-log*.
- Gráfica de  $q$  contra  $t$  en papel semilogarítmico.

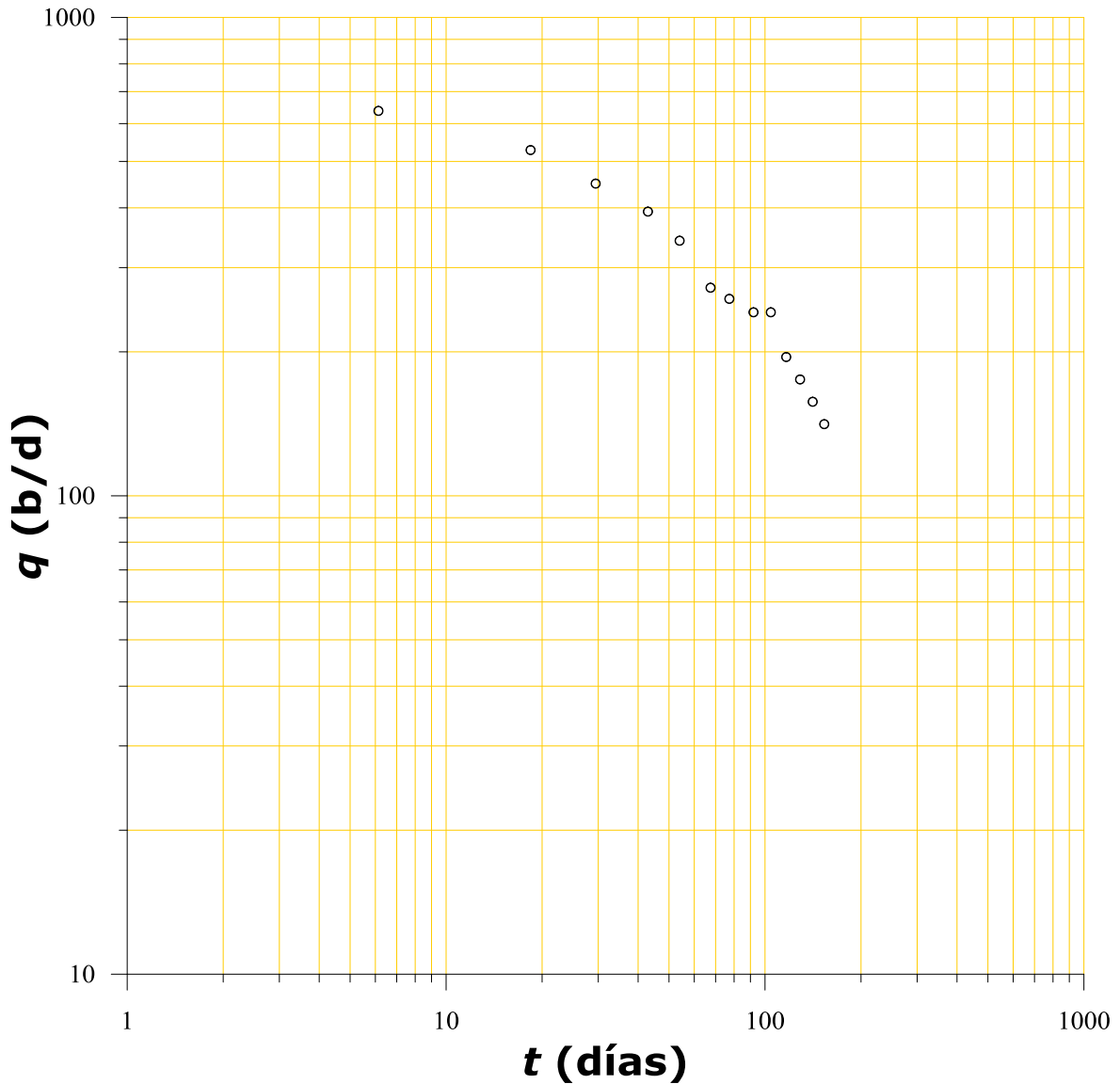




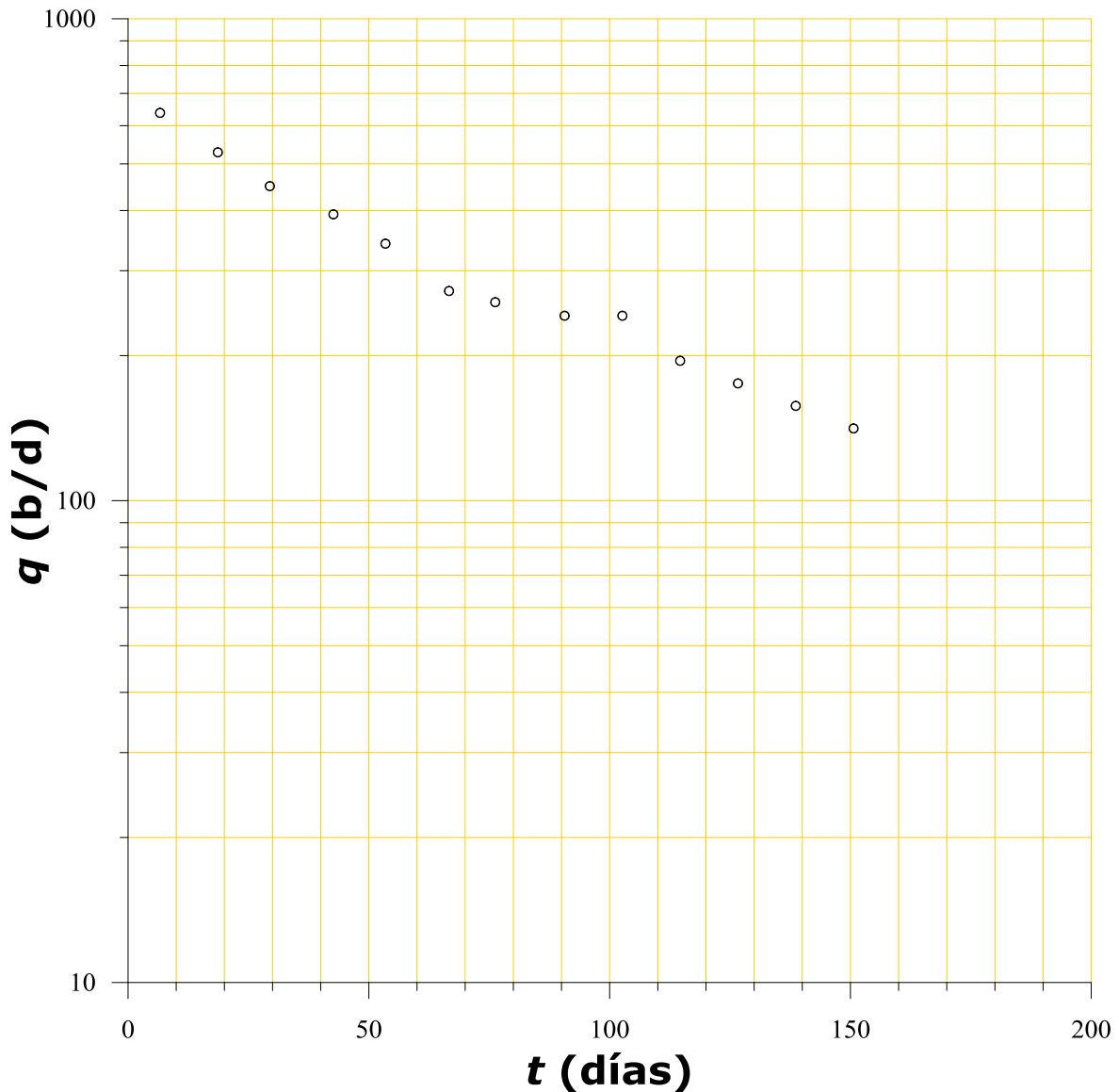
**Figura 4.** Comportamiento general del flujo en función del tiempo.

En la Figura 5 se muestra la gráfica *log-log* de los datos de producción contra tiempo, la cual es útil para adquirir una idea previa del comportamiento de la declinación. La Figura 6 es una gráfica del logaritmo del flujo contra tiempo, construida a partir de los datos de la

Tabla 2. A través del ajuste de los datos se obtiene la ecuación de una línea recta que corresponde a la ecuación (3) ( $q = q_i e^{-Dt}$ ).



**Figura 5.** Gráfica *log-log* de flujo contra tiempo con datos del pozo analizado (Golan & Whitson, 2003).



**Figura 6.** Gráfica del logaritmo del flujo contra tiempo del pozo analizado, cuyos datos se muestran en la Tabla 2 (Golan & Whitson, 2003).

El ajuste a una línea recta permite obtener sus parámetros característicos (la ordenada al origen y su pendiente). La ordenada al origen corresponde al flujo inicial  $q_i$ , mientras que con la pendiente se obtiene el ritmo de declinación ( $D$ ). Así, los valores son:

$$q_i = 675 (b/d) = (4472 \text{ lt/h})$$

$$D = 1.598 \frac{(b/d)}{\text{mes}}$$

A falta de mediciones históricas de producción, los parámetros de la ecuación (3) también se pueden determinar a partir de los datos del yacimiento. Con las ecuaciones (1) y (2) se determinan  $q_i$  y  $D$  usando datos obtenidos a partir de pruebas transitorias de presión. En la Tabla 3 se muestran los valores determinados por una prueba de presión efectuada en el pozo.

Aplicando la ecuación (1) y sustituyendo los valores de la prueba de presión se tiene que:

$$q_i = \frac{0.392(121)(5790 - 800)}{141.2(0.46)1.36 \left[ \ln\left(\frac{1490}{11.75}\right) - 0.5 \right]} \quad (24) = 655.8 \left[ \frac{b}{d} \right] = 19674 \left[ \frac{b}{\text{mes}} \right] = 4345 \left[ \frac{\text{lt}}{\text{h}} \right]$$

Aplicando la ecuación (2) y sustituyendo los valores proporcionados en la Tabla 3 se tiene que:

$$D = \frac{2(0.000264)(0.392)}{0.101(0.46)(1.09 \times 10^{-6})(1490^2 - 11.75^2) \left[ \ln\left(\frac{1490}{11.75}\right) - 0.5 \right]} (3600)$$

$$D = 1.526 (b/d)/\text{mes}$$

Los valores de  $q_i$  y  $D$  calculados con la ecuación de Arps difieren muy poco de los valores obtenidos empleando las ecuaciones propuestas por Fetkovich. Lo anterior debido a las consideraciones particulares con que fueron desarrollados ambos métodos; sin embargo, lo importante de la aplicación de la metodología es que proporciona un criterio sobre el rango de los parámetros de la declinación en el pozo analizado. De igual

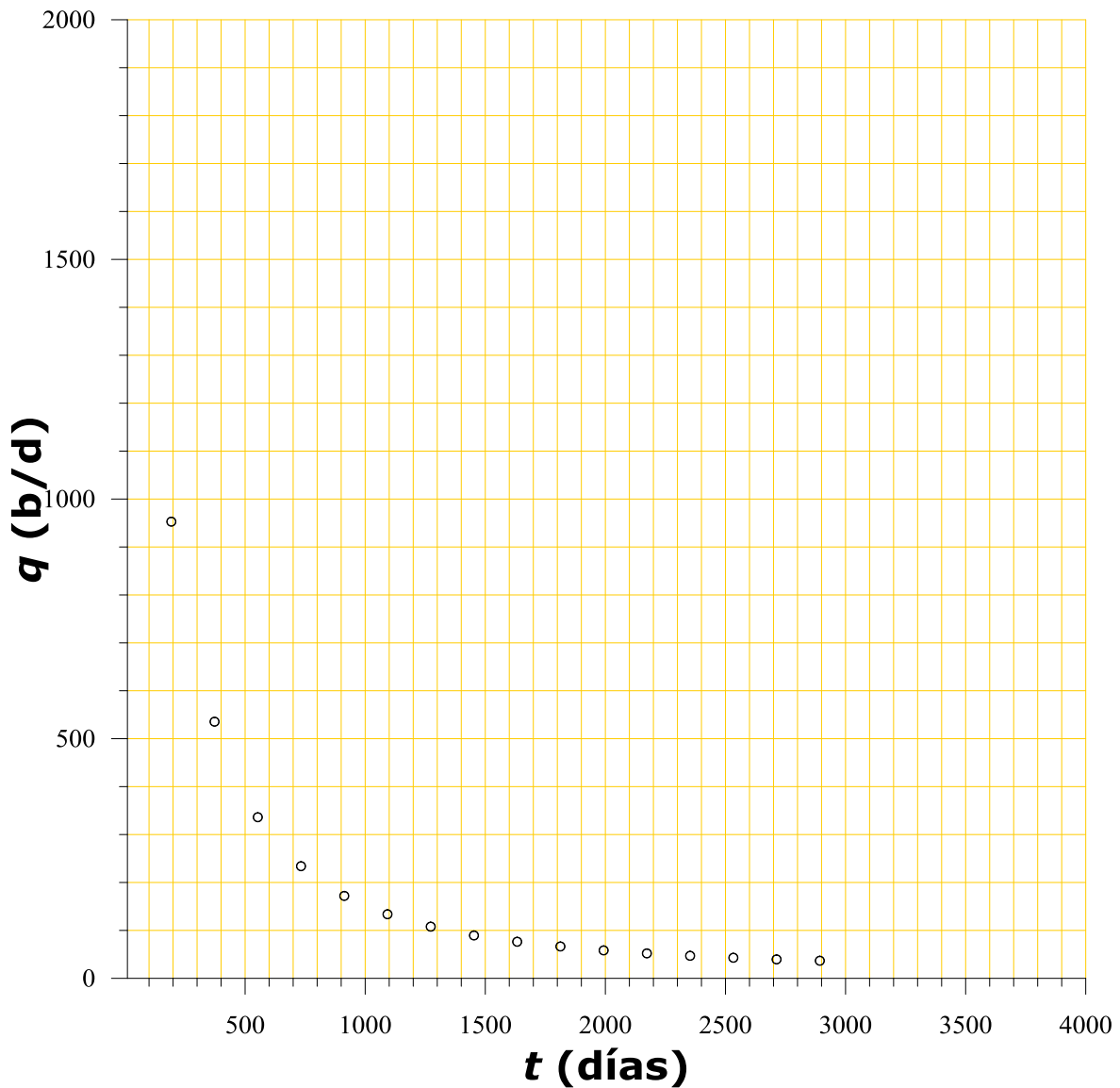
forma, se puede identificar el alto valor en el ritmo de declinación del pozo en conjunto con su bajo gasto inicial de flujo. Por el motivo anterior, para mostrar el uso de las curvas tipo, en la Tabla 4 aparecen los datos de tiempo, flujo volumétrico y producción acumulada de otro pozo de petróleo, con los cuales se desarrolla un análisis de la declinación de su producción.

**Tabla 4.** Datos medidos: tiempo ( $t$ ), flujo volumétrico ( $q$ ) y volumen producido acumulado ( $N_p$ ), que se utilizan para el análisis de declinación de la producción, aplicando el método de curvas tipo. \*MM se utiliza para denotar millones.

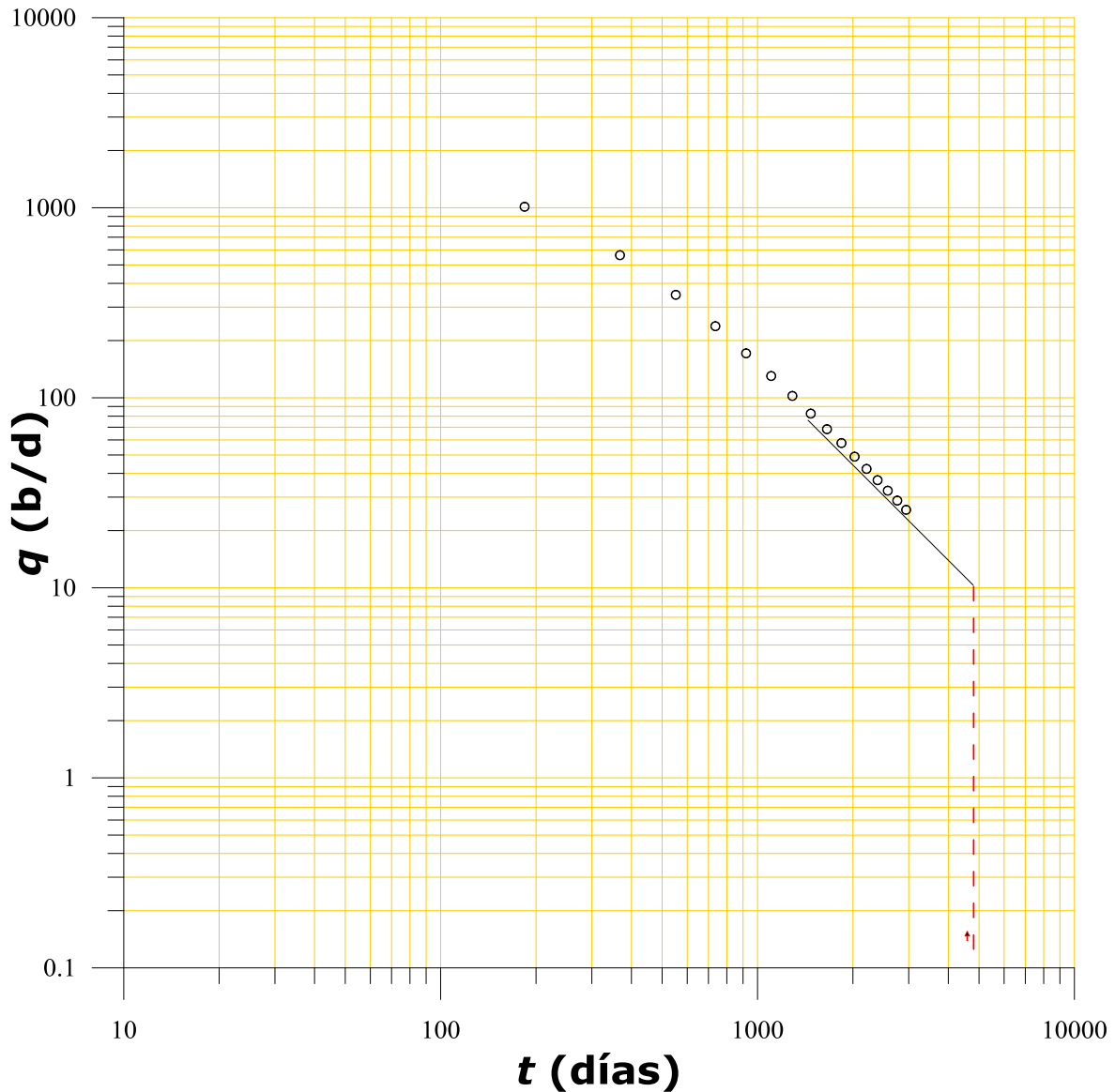
$t$ (días)	$q$ (brl/d)	$N_p$ (brl)	$q$ (l/h)	$N_p$ (*MM l)
180	940.00	169 200	6 227.50	26.902
360	522.67	263 280	3 462.69	41.861
540	323.33	321 480	2 142.06	51.115
720	221.17	361 290	1 465.25	57.445
900	159.17	389 940	1 054.50	62.001
1 080	120.93	411 708	801.16	65.461
1 260	95.00	428 808	629.38	68.180
1 440	76.67	442 608	507.94	70.374
1 620	63.50	454 038	420.69	71.192
1 800	53.67	463 698	355.56	73.727
1 980	45.50	471 888	301.44	75.030
2 160	39.23	478 950	259.90	76.153
2 340	34.23	485 112	226.77	77.132
2 520	30.13	490 536	199.61	77.995
2 700	26.73	495 348	177.09	78.760
2 880	23.90	499 650	158.34	79.444

Con el objeto de tener un diagnóstico general para el análisis del comportamiento del pozo, con los datos proporcionados se construye la

gráfica de la Figura 7, que ilustra el comportamiento del flujo respecto al tiempo en coordenadas cartesianas. En la Figura 8 se muestra la gráfica de las mismas variables en coordenadas doble logarítmicas.



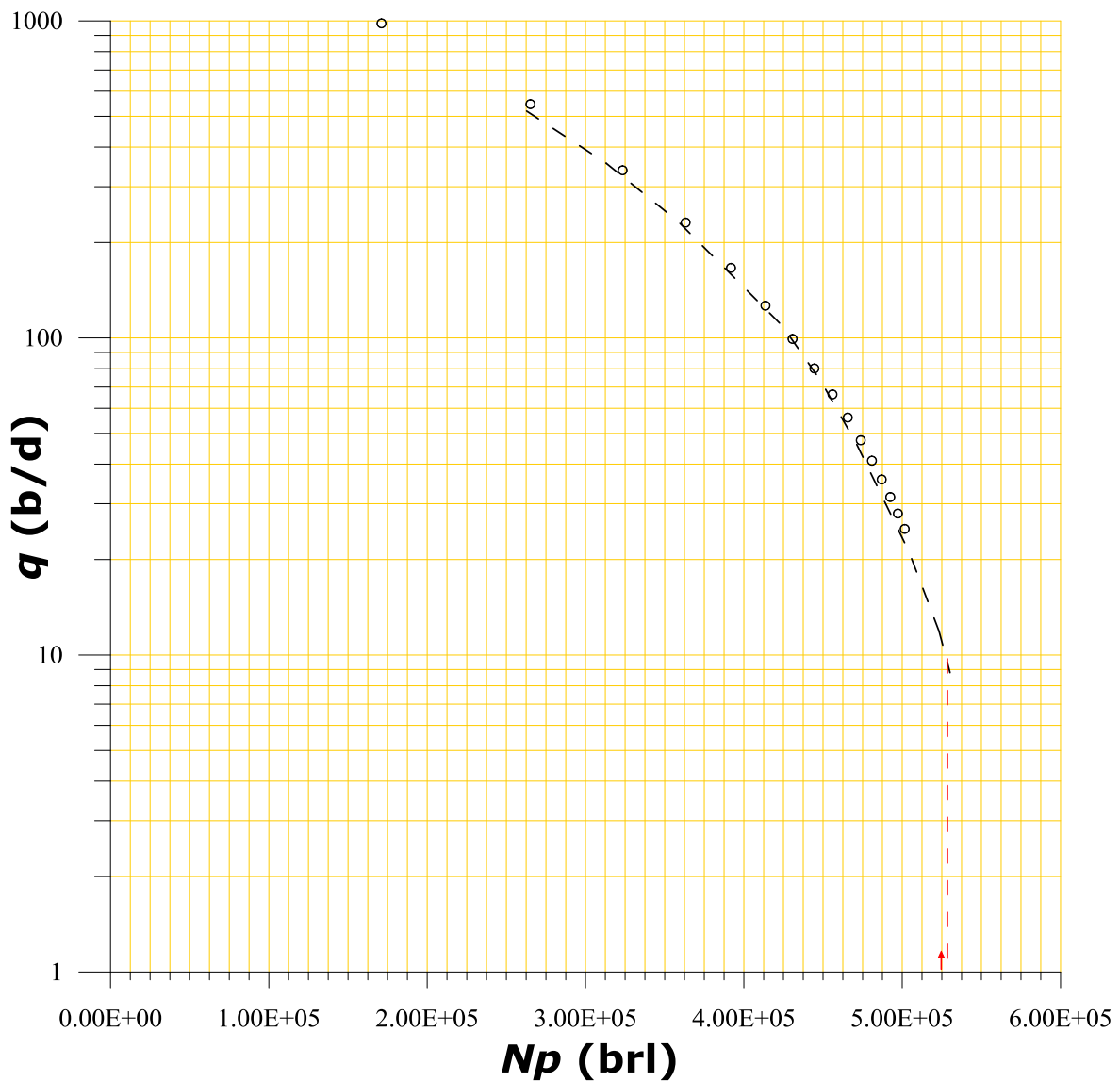
**Figura 7.** Comportamiento de los datos de producción respecto al tiempo, para hacer un diagnóstico general del comportamiento de los parámetros.



**Figura 8.** Gráfica en escala doble logarítmica del flujo volumétrico respecto al tiempo.

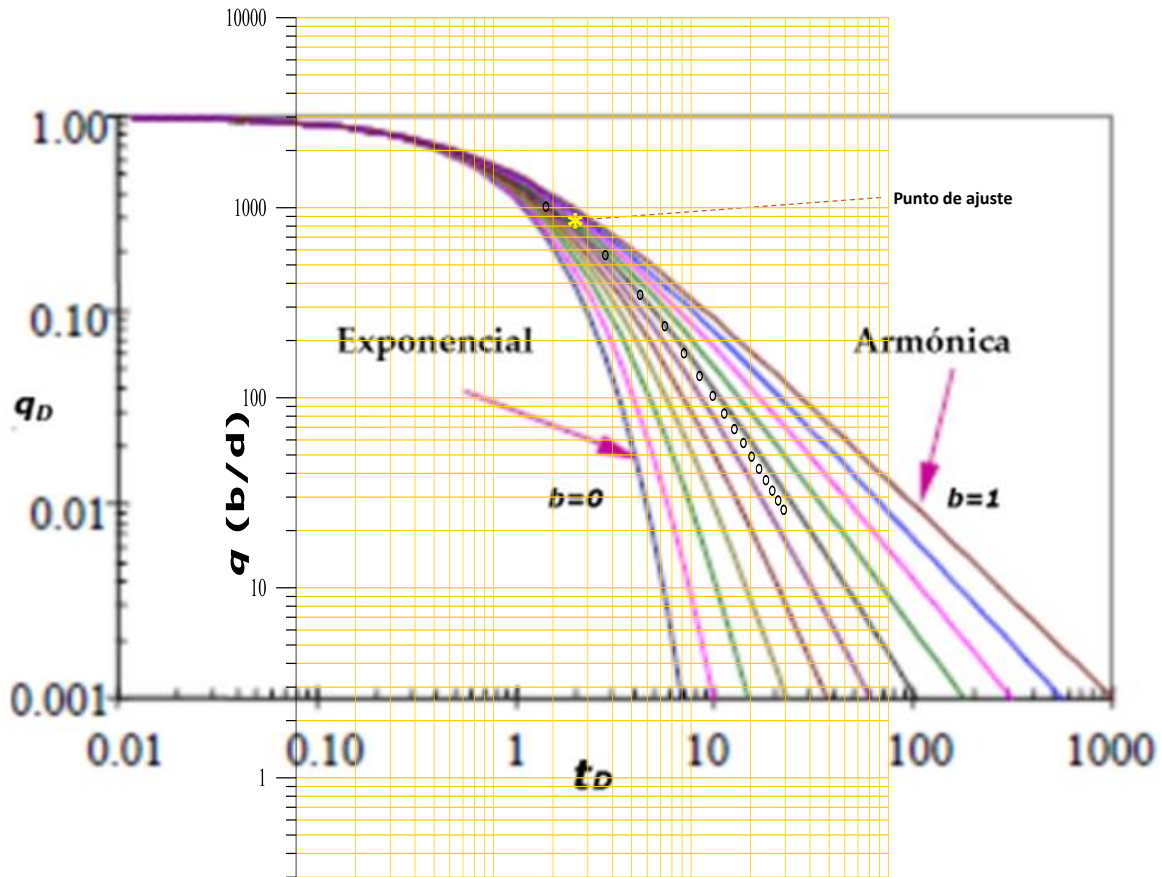
La Figura 9 muestra el comportamiento del flujo volumétrico ( $q$ ) respecto al volumen producido acumulado ( $N_p$ ). La Figura 10 muestra la sobreposición de los valores de producción (tiempo, flujo) en escala doble logarítmica sobre la curva tipo de la Figura 1. Es conveniente enfatizar en el cuidado especial que se debe tener en que las escalas de

ambas gráficas sean de la misma magnitud para identificar la curva tipo que mejor se ajuste con los datos medidos.



**Figura 9.** Gráfica de comportamiento del flujo volumétrico ( $q$ ) respecto al volumen producido acumulado ( $N_p$ ).





**Figura 10.** Ajuste de los datos de producción del pozo sobre la curva tipo de declinación.

Usando la gráfica de la Figura 8 y los datos de producción de la Tabla 4 se asume que el pozo ha declinado un 97.5% en 2 880 días. De la gráfica se puede inferir que a este ritmo de declinación el límite económico crítico de flujo ( $10 \text{ t/h}$ ) se alcanzaría aproximadamente en poco menos de 5 000 días. Al usar el método analítico se seleccionan de la historia de producción del pozo los valores más cercanos a la extrapolación y se ajustan a una ecuación, cuya expresión resultante es:

$$t = \frac{10 - 248.0056}{-0.0490318} = 4854 \text{ (días)} = 161.8 \text{ (meses)}$$

La combinación del volumen producido acumulado ( $N_p$ ) y el flujo volumétrico ( $q$ ) se utiliza para determinar el volumen máximo recuperable en el pozo, es decir, la reserva total. Asumiendo como límite económico del pozo una producción de  $10 \text{ b/d}$ , el volumen máximo producible se puede determinar extrapolando la gráfica a este valor límite, como se muestra en la Figura 9. La determinación gráfica para este caso resulta ser ligeramente superior a  $500(10^3) \text{ b}$ , la cual se podría asumir como la reserva total del pozo. La ecuación de ajuste obtenida para este pozo está dada por:

$$N_p = \frac{10 - 514.253}{-0.00098796} = 510400 \text{ (b)}$$

Los datos de la Tabla 4 muestran que la producción acumulada en el pozo es de  $49\,9650 \text{ (b)}$ ; este valor representa  $97.8\%$  de agotamiento en la reserva; por tanto, la reserva remanente es de  $2.2\%$ . Sin embargo, el tiempo aproximado en que se llegará al límite económico del pozo es de  $4\,854$  días. Esto es, los  $2\,880$  días que ha estado produciendo el pozo representan  $59.3\%$  del total de vida útil estimada. Parecería que se trata de un excelente pozo, porque aún tiene un  $40.7\%$  de vida útil. Sin embargo, hay que considerar que el gasto inicial en el pozo es de  $940 \text{ (b/d)}$  y a  $2\,880$  días el flujo es de  $23.9 \text{ (b/d)}$ , lo cual significa que la masa producida acumulada representa  $97.9\%$  del total de fluido explotable. Por tanto, en los últimos  $1\,974$  días de vida útil ( $4\,854 - 2\,880$ ) se extraerá la reserva remanente de  $10\,750 \text{ (b)}$  ( $510\,400 - 499\,650$ ) a un flujo menor de  $23.9 \text{ (b/d)}$  hasta llegar al límite económico.

Como se puede observar en la Figura 10, los datos de flujo contra tiempo graficados en papel *log-log* se ajustan a la curva tipo, cuyo valor de  $n$  es igual a  $0.5$ . De acuerdo con el ajuste de los datos de producción del pozo analizado, se puede inferir que su tipo de declinación es hiperbólico.

Los valores del punto de ajuste resultantes de la comparación entre los valores graficados ( $t, q$ ) en escala doble logarítmica y la curva tipo de la Figura 1 son:

Para la gráfica de valores medidos en el pozo se tiene  $t = 180$  y  $q = 1\,000$ .

Mientras que los valores correspondientes al mismo punto en la curva tipo son  $(t_D) = 1.4$  y  $(q_D) = 0.38$ .

La determinación del flujo volumétrico inicial ( $q_i$ ) y el ritmo de declinación inicial ( $D_i$ ) se obtiene por medio de la sustitución de los valores anteriores en las ecuaciones (5) y (6), tal como se muestra a continuación:

$$q_i = \frac{100}{0.38} = 2631 \left( \frac{b}{d} \right)$$

y

$$D_i = \frac{1.4}{180} = 0.008 \left( \frac{b}{d} \right) = 0.24 \left[ \frac{b/d}{mes} \right]$$

Además, a partir de los valores de las variables adimensionales  $t_D$  y  $q_D$ , obtenidas en el ajuste con la curva tipo, es posible la determinación de las características de la formación aplicando las ecuaciones (8) y (11). Para satisfacer las condiciones de las variables del yacimiento que requieren estas ecuaciones se utilizan valores obtenidos a través del uso de otras técnicas, como pruebas de presión, mediciones de laboratorio, y/o estudios geológicos o geofísicos.

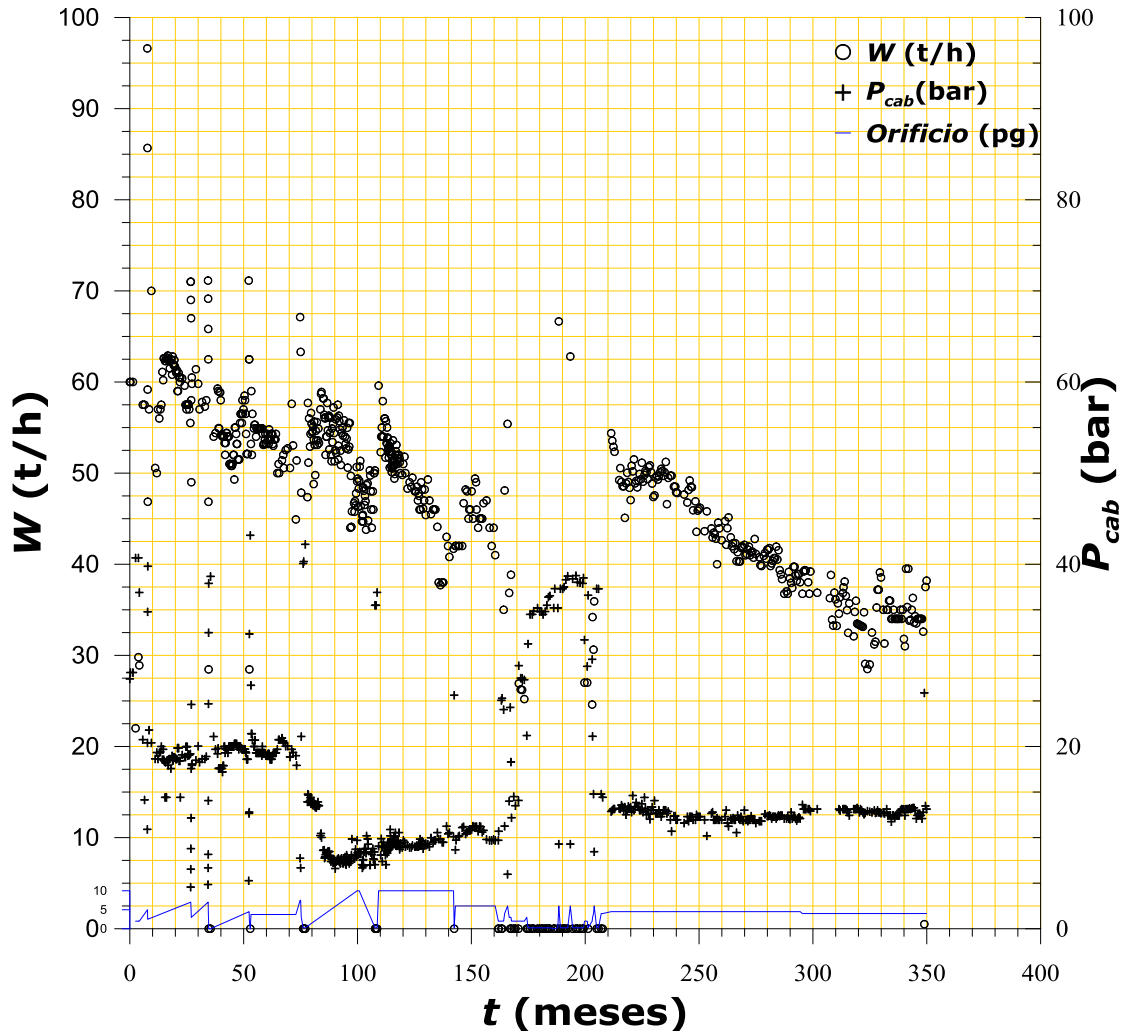
Con la ecuación (8) se obtiene, de acuerdo con la Tabla 1, la permeabilidad ( $k$ ), o dependiendo de las variables se obtiene  $(kh)$  o  $(k/\mu)$ , o bien  $(kh/\mu)$  de la formación con la ecuación (9). Mientras que con la ecuación (11) se determina la porosidad  $\phi$  o, en su caso, el almacenaje de la formación  $\phi C_T h$  con la ecuación (12). Lo anterior, dependiendo del conocimiento del espesor de la formación productora ( $h$ ), de la viscosidad del fluido ( $\mu$ ) y de la compresibilidad total del sistema ( $C_T$ ). El factor de volumen ( $B$ ) se obtiene a partir de análisis de laboratorio sobre el comportamiento del fluido, partiendo de las condiciones de fondo y terminando en las condiciones de superficie. La presión inicial ( $p_i$ ) se determina a partir de las mediciones que se realizan en el pozo. Es posible determinar la presión de fondo fluyendo ( $p_{wf}$ ), bien con las pruebas transitorias de presión, o bien a través del

uso de simuladores o, si es posible, también a partir de mediciones con herramientas de registros.

## Caso de un pozo geotérmico

A lo largo del desarrollo de la industria geotérmica, muchas de las técnicas aplicadas a yacimientos petroleros se han estado adaptando para su aplicación en sistemas geotérmicos. La única condición para la aplicación de esta metodología es tener en cuenta las características del fluido de cada sistema, mantener la consistencia en las unidades y tener cuidado en el uso de los correspondientes factores de conversión.

Por lo general, en pozos geotérmicos la producción se expresa en flujo másico ( $W$ ), a diferencia de cómo se ha venido expresando para pozos de petróleo, que se utiliza el flujo volumétrico ( $q$ ). Con la finalidad de demostrar el uso de las técnicas de análisis de declinación, se muestra la gráfica de la Figura 11, que corresponde a datos de producción de un pozo de un campo geotérmico mexicano (Arellano, Torres, & Barragán, 2005; Aragón-Aguilar *et al.*, 2013). La historia de producción del pozo cubre un periodo de 340 meses y en esta gráfica se puede observar el comportamiento de su flujo másico, su presión de cabezal y sus diámetros de orificio de descarga en función del tiempo.



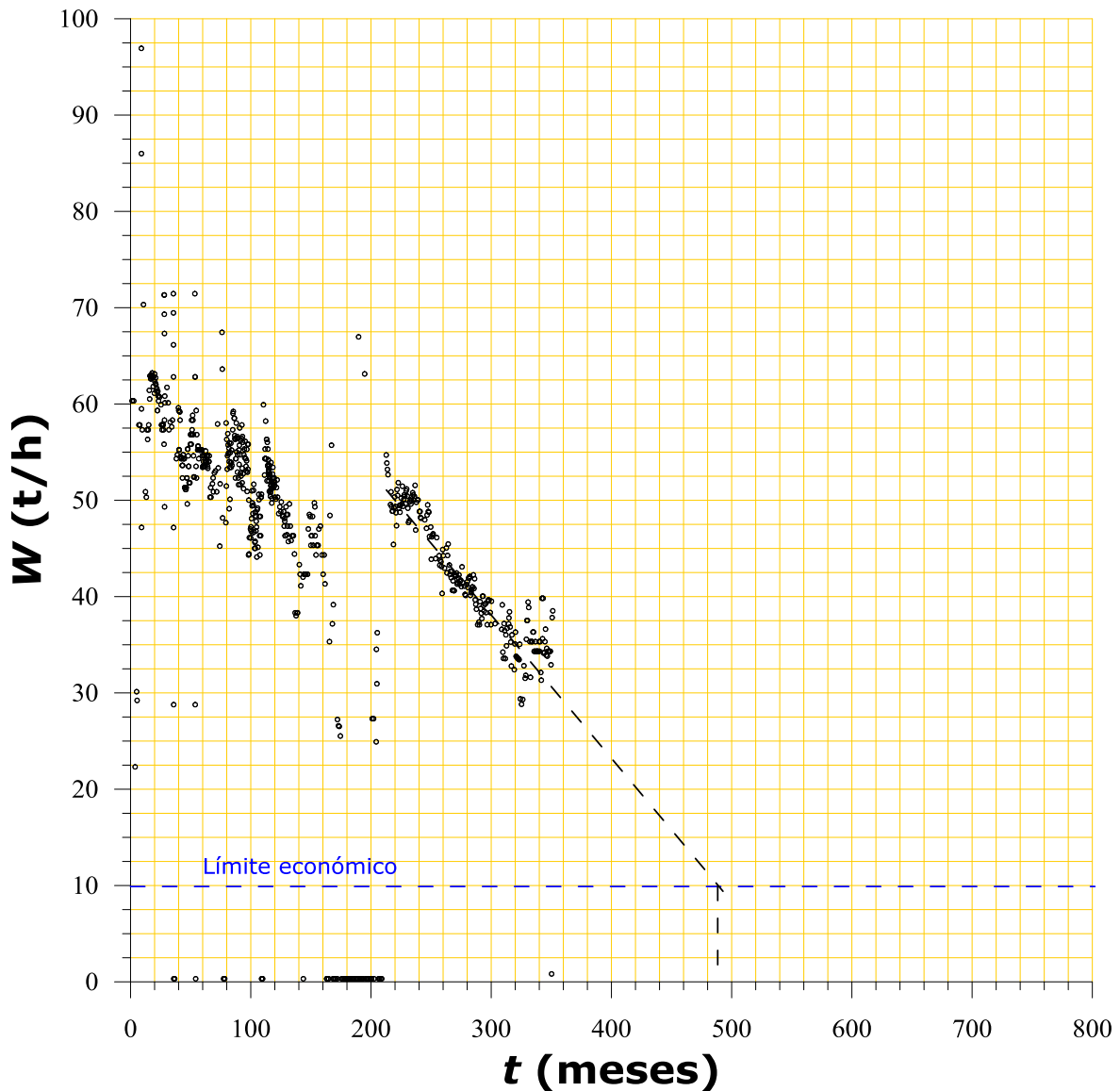
**Figura 11.** Gráfica de diagnóstico general del comportamiento de la producción, la presión de cabezal y la variación del orificio de descarga en función del tiempo.

La utilidad de la gráfica para diagnóstico general de los datos y su aplicación a los análisis de declinación está orientada a obtener una visión del comportamiento general de la prueba. Mientras se disponga de mayor cantidad de datos correlacionables entre sí se podrá hacer un análisis con mayor confiabilidad. Lo anterior, porque en las operaciones prácticas de campo no siempre se puede mantener constante el flujo, lo cual influye en la presión.

Debido a la movilidad de los fluidos y los procesos de ebullición para mantener la presión de descarga en pozos geotérmicos se aplican variaciones en el diámetro del orificio; no obstante, prevalece el comportamiento de declinación en la producción. Una de las gráficas de diagnóstico se muestra en la Figura 11, en la cual se puede identificar el comportamiento de la declinación en las mediciones del flujo bajo diferentes condiciones de apertura del orificio de descarga del pozo.

En esta figura se puede identificar un cierre en el pozo entre los meses 150 y 200, lo cual provoca que la presión de cabezal se incremente de modo abrupto, alcanzando valores cercanos a su condición estática. Sin embargo, al abrir de nuevo el pozo a un orificio de descarga similar al que estaba operando, el flujo es ligeramente superior (en un 5%) al que existía al momento del cierre. Lo anterior es una evidencia de que el cierre provocó una ligera recuperación en el pozo; sin embargo, la tendencia en la declinación se mantuvo con una pendiente similar a la que venía mostrando antes del cierre.

La Figura 12 muestra la gráfica de los datos de producción en función del tiempo. Esta misma gráfica, pero en escala *log-log*, es la que se utiliza dentro de la metodología de ajuste por comparación con la curva tipo.



**Figura 12.** Determinación del tiempo en que el pozo llega al límite económico.

Otra aplicación interesante de esta gráfica es su utilidad para determinar el tiempo en que el pozo, de acuerdo con la tendencia en su declinación, podría llegar al límite económico de producción. Para el caso de los campos geotérmicos, el límite económico está regido por el índice de

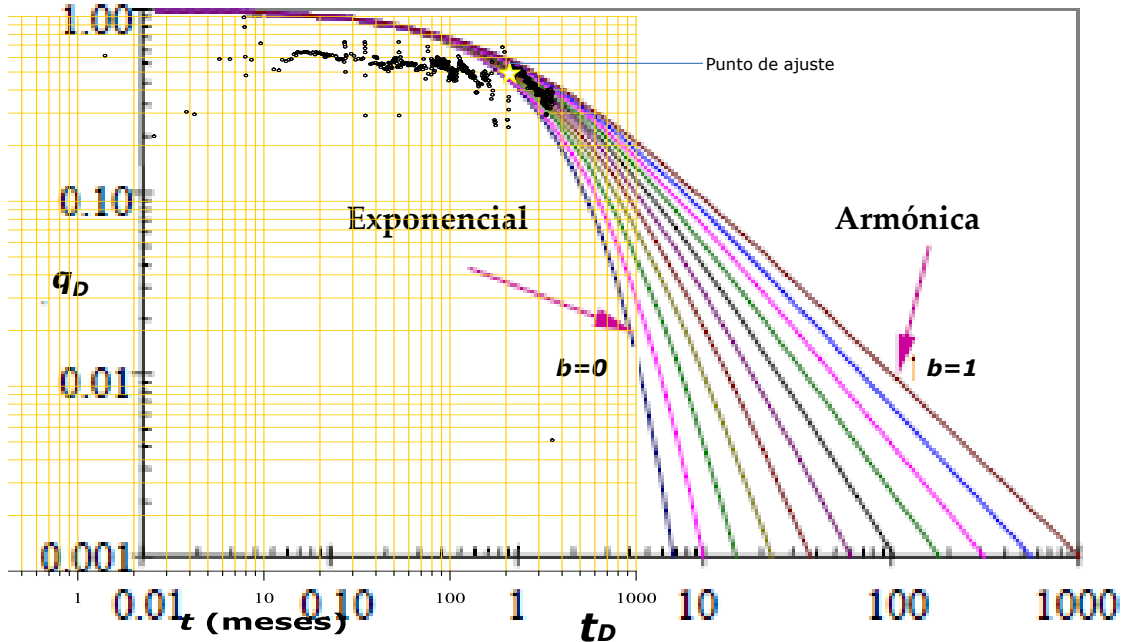
capacidad de la planta para generar al menos 1 MWe, con 10 (t/h) de vapor a 7 bars de presión. De acuerdo con lo anterior, en la gráfica se muestra la extrapolación de la última pendiente de la tendencia de declinación hasta cortar el valor para flujo másico de 10 (t/h). De manera gráfica, se puede observar que el tiempo, al cual el flujo llega al límite económico, es de unos 495 meses. Usando el ajuste de los datos de esta última sección de declinación con pendiente constante se obtiene una ecuación con la siguiente forma:

$$W = -0.14636 (t) + 82.148$$

Pudiéndose determinar el valor de  $t = 492$  meses, para  $W = 10$  (t/h), el cual es un valor cercano al que se obtiene de manera gráfica. De acuerdo con los resultados obtenidos, por una parte, a partir de la Figura 11 se asume que el pozo tiene ya unos 340 meses de producción. Por tanto, el tiempo remanente de producción podría estimarse en unos 152 (492-340) meses. Esto es, el pozo, ha consumido ya, de manera aproximada (340/492) 69% de su vida productiva.

La constante de declinación del pozo y los parámetros de la formación se obtienen a través de la gráfica de la Figura 12, cuidando que los ejes logarítmicos sean de la misma magnitud de los de la curva tipo. Con el fin de obtener los parámetros de la formación, se compara esta gráfica con la curva tipo de la Figura 1 y se busca la curva a la que se ajustan mejor los datos. Tal procedimiento se muestra en la Figura 13.





**Figura 13.** Sobreposición de los datos de producción a una de las curvas, usando la técnica de ajuste por medio de la curva tipo de declinación.

Los valores del punto de ajuste que se determinan en cada gráfica son:

Para la gráfica doble logarítmica (datos medidos):  $t = 50$  (meses);  
 $q = 50$  ( $t/h$ ).

Mientras que para la curva tipo, se tienen:  $t_D = 0.22$ ;  $q_D = 0.78$ .

La determinación del flujo volumétrico inicial ( $q_i$ ) y el ritmo de declinación inicial ( $D_i$ ) se efectúa por medio de la sustitución de los valores anteriores en las ecuaciones (5) y (6). Por lo tanto, se tiene que:

$$q_i = \frac{50}{0.78} = 64 \left[ \frac{t}{h} \right]$$

Y aplicando la ecuación (6):

$$D_i = \frac{0.22}{50} = 0.0044 \left[ \frac{t/h}{mes} \right]$$

En relación con el gasto inicial ( $q_i$ ) obtenido a partir de la curva tipo es conveniente mencionar las gráficas de la Figura 11 y Figura 12. En ambas se puede observar que incluso cuando existe dispersión en los valores, se puede estimar un valor inicial del flujo másico ( $q_i$ ) cercano a 64 (t/h), el cual es congruente con el obtenido usando la ecuación (5).

Empleando la ecuación (7) se asumió un valor típico de  $B$  para un sistema geotérmico y se usó un simulador de flujo en pozos, para determinar ( $p_i - p_{wf}$ ). Se tuvo especial cuidado en usar unidades consistentes para el cálculo del valor de la transmisividad de la formación:

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{141.2 q_B}{q_D^h (p_i - p_{wf})} = \frac{141.2 (64) 1.0345}{0.78 (55)} = 217.9 \frac{mD (pie)}{cp} = 66.4 \frac{mD (m)}{cp}$$

Por otra parte, usando la ecuación (8), y sustituyendo el valor de la transmisividad, obtenido previamente, es factible determinar el almacenaje de la formación. El valor del radio aparente del pozo  $r_{wa}$  se obtiene a partir de pruebas de presión. Sin embargo, a falta de mayor información, se puede asumir un rango entre  $1E^2$  y  $1E^3$ , por lo cual se obtienen valores de acuerdo con esta variación. Sustituyendo valores y usando unidades consistentes se tiene:

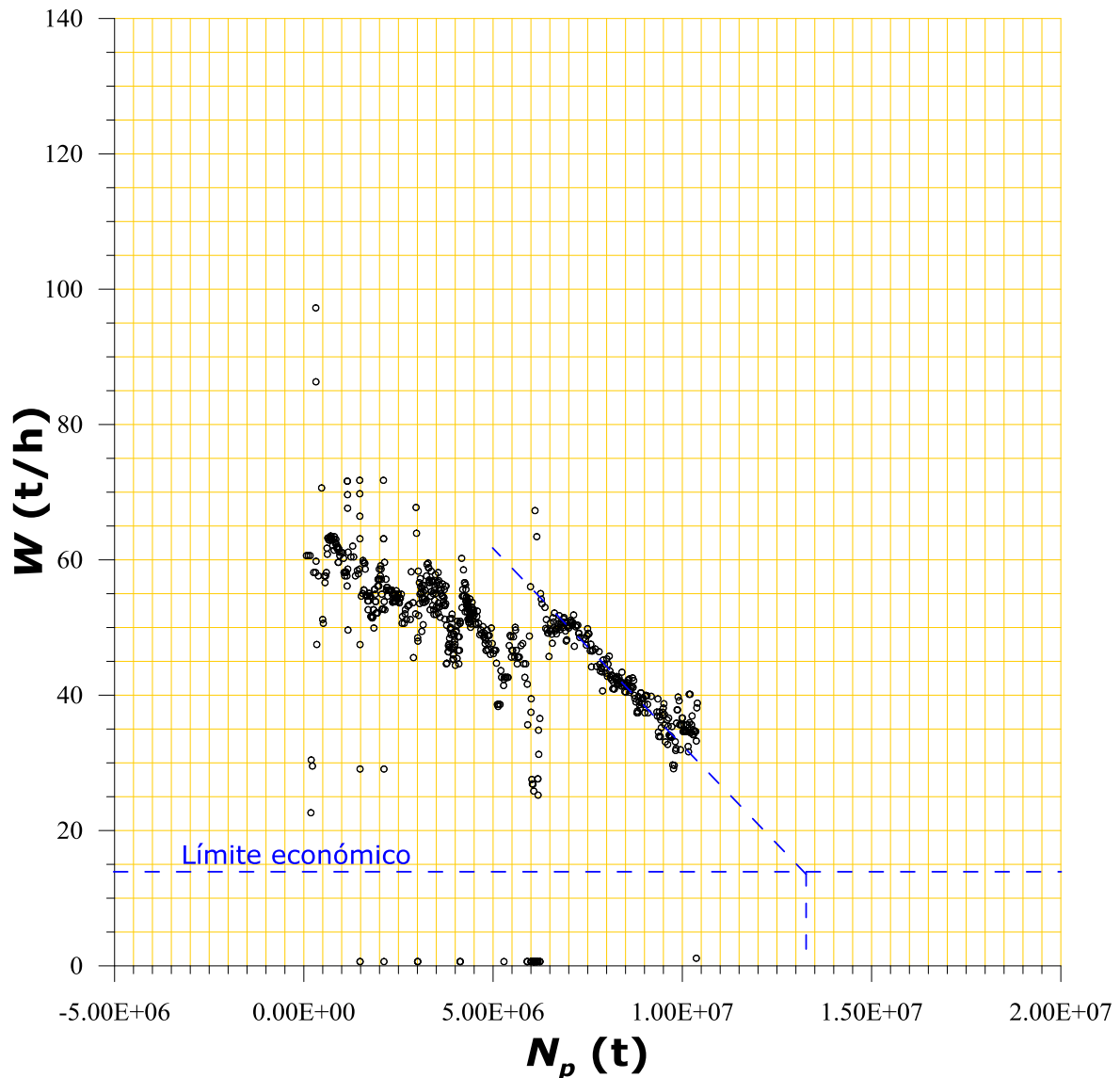
$$\phi C_t h = \frac{0.00634t}{t_D r_{wa}^2} \frac{kh}{\mu} = \frac{0.00634 (50)}{0.22 r_{wa}^2} (0.2179)$$

Debido a la incertidumbre en el conocimiento de  $r_{wa}$ , el resultado se puede dejar indicado como una función de esta variable. Bajo este punto de vista se tiene que el valor del almacenaje para este pozo es equivalente a:

$$\phi C_t h = 0.31397 / (r_{wa})^2$$

En yacimientos petroleros, la compresibilidad de la formación ( $C_t$ ) y el espesor ( $h$ ) son parámetros que se pueden determinar por mediciones, y por este motivo se puede calcular de forma directa el valor de la porosidad ( $\phi$ ). No obstante, en sistemas geotérmicos, por lo general no se dispone de datos experimentales de la compresibilidad debido a la imposibilidad de preservar la temperatura del yacimiento en los núcleos en su traslado a los laboratorios. Asimismo, no se puede determinar con certidumbre el espesor ( $h$ ), porque la mayoría de los sistemas geotérmicos se encuentran en formaciones volcánicas, cuyas características provocan incertidumbre en la determinación de la longitud de los espesores de producción. Por lo anterior, resulta una práctica común en sistemas geotérmicos determinar un índice de transmisividad ( $kh/\mu$ ) y el almacenaje  $\phi C_t h$ , en lugar de la permeabilidad y porosidad que se calcula en yacimientos petroleros.

La otra gráfica que se utiliza es la del flujo contra la producción acumulada ( $N_p$ ), cuya extrapolación al límite económico permite la estimación de la reserva total del pozo, tal como se muestra en la Figura 14. El comportamiento de la producción más cercano a la extrapolación es el que se considera como representativo por la superación de los efectos transitorios en el pozo analizado. Por este motivo, se tomó la última pendiente de la tendencia de declinación, extrapolándola al límite económico del flujo de 10 ( $t/h$ ).



**Figura 14.** Comportamiento del flujo producido respecto a la producción acumulada en el pozo, para determinar la probable reserva.

Con la interpolación gráfica se obtiene que al alcanzar el límite económico, el flujo producido acumulado ( $N_p$ ) sería de  $14.75 E^6$  (ton), como se puede observar en la Figura 14. Mediante el ajuste de los datos de este último periodo se obtiene una ecuación de la siguiente forma:

$$W = -4.87913E^{-6} (N_p) + 82.183583$$

Escribiendo la expresión para obtener  $N_p$  como función de  $W$  se obtiene:

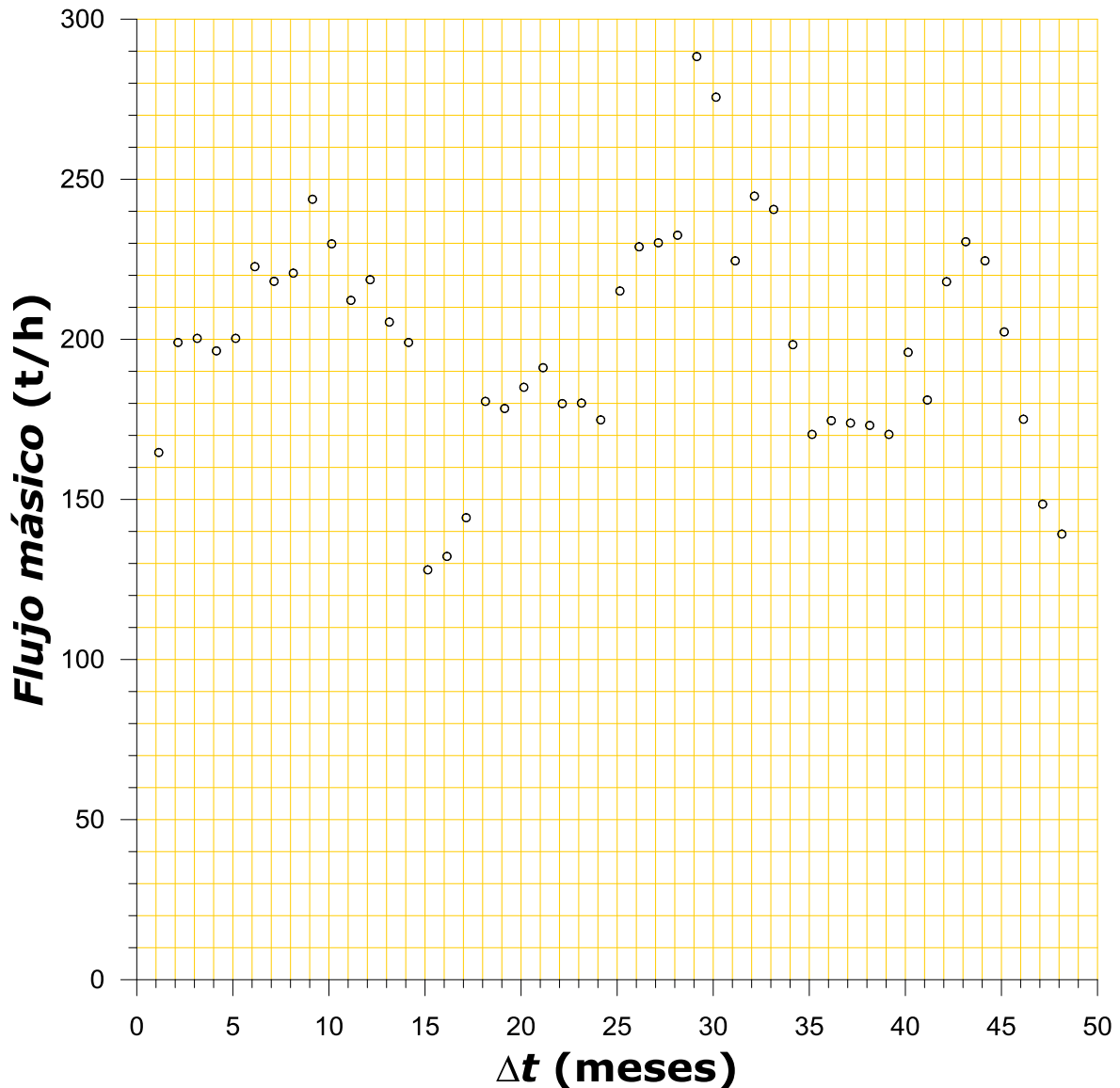
$$N_p = \frac{W - 82.1836}{-4.8791E^{-6}}$$

Sustituyendo el valor de  $W = 10$  en la expresión anterior se obtiene el valor de  $N_p = 14.794 (10^6 \text{ (ton)})$ , el cual representa la reserva total del pozo. De acuerdo con los datos medidos, la masa producida acumulada en el pozo analizado es un poco más de  $10 \times 10^6 \text{ (ton)}$ , lo cual representa una recuperación aproximada de 67.6% ( $10/14.794$ ) del total de reserva.

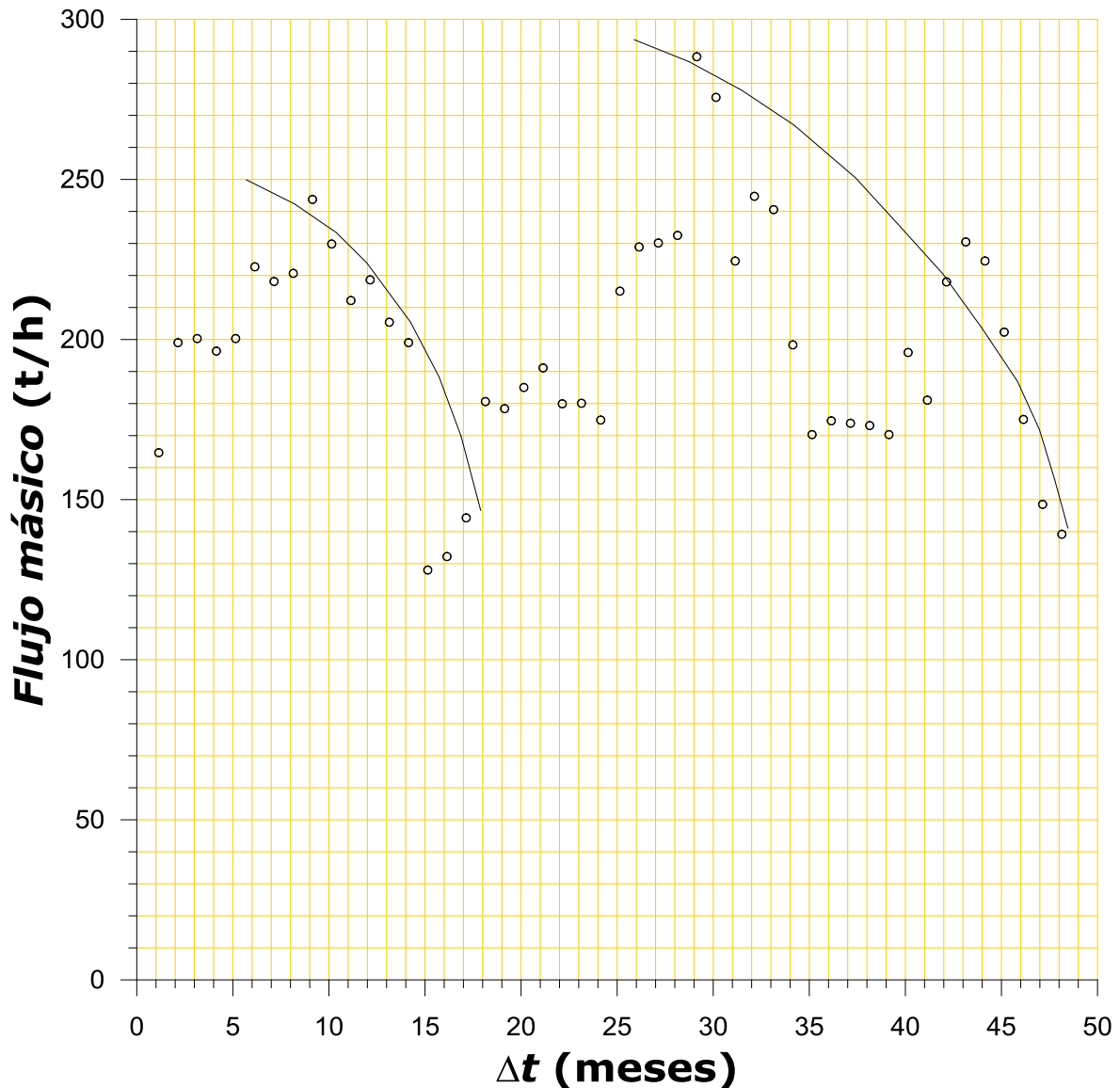
## Caso de un pozo de agua

El pozo de agua que se utiliza dentro de este trabajo se ubica en el área de Oakwood del condado de Montgomery en Ohio, EUA (Dursch & Wenclewicz, 2017). Está terminado en un intervalo con alta dureza de agua ( $CaCO_3$ ) entre 200 y 250 ppm y Cl (concentraciones entre 300 y 350 ppm). Estas circunstancias influyen en depositaciones dentro de la tubería, que se reflejan en disminuciones en la producción. Se obtuvieron datos (Dursch & Wenclewicz, 2017) de 50 meses de su vida productiva que se muestran en la gráfica de diagnóstico general en la Figura 15. Se pueden identificar dos tendencias de declinación: una a tiempo temprano (a partir del mes nueve), y la segunda a partir del mes 32. Las depositaciones en la declinación a tiempo temprano se prolongaron por seis meses. Después de la declinación a tiempo temprano, se desarrollaron actividades para mejorar su productividad, lo cual resultó en una mejora. Sin embargo, el pozo nuevamente mostró una tendencia de declinación, y a partir del mes 31 de nuevo inicia una

declinación un poco menos severa. Ambos periodos de declinación en el pozo se muestran en la gráfica de la Figura 16.



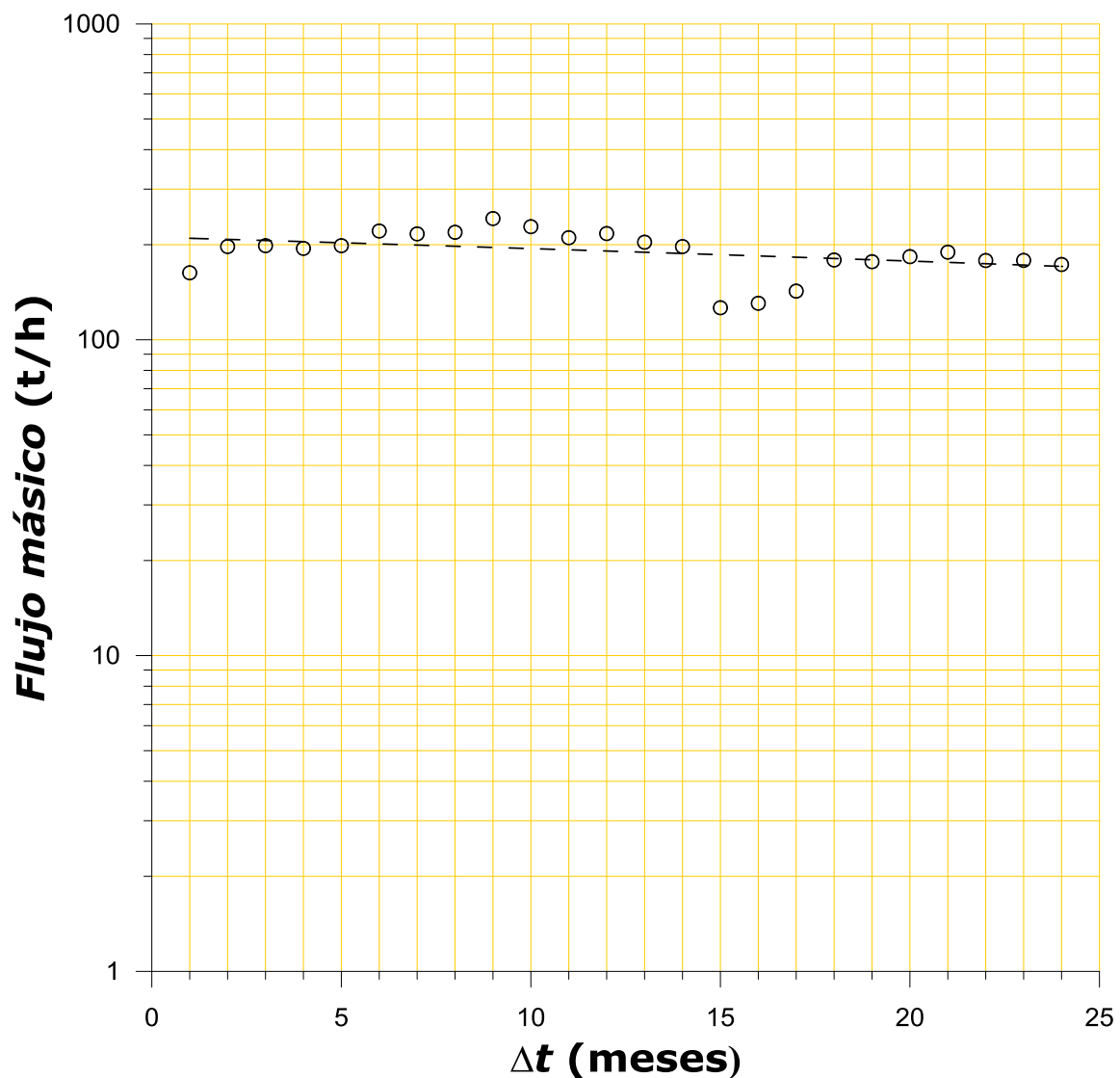
**Figura 15.** Gráfica de diagnóstico general del comportamiento de la productividad del pozo de agua (Dursch & Wenclewicz, 2017), en función de su tiempo de explotación.



**Figura 16.** Comportamiento de la productividad del pozo de agua (Dursch & Wenclewicz, 2017), que muestra dos periodos de declinación: uno a tiempo temprano (entre 9 y 16 meses) y otro a partir del mes 28 de su vida productiva.

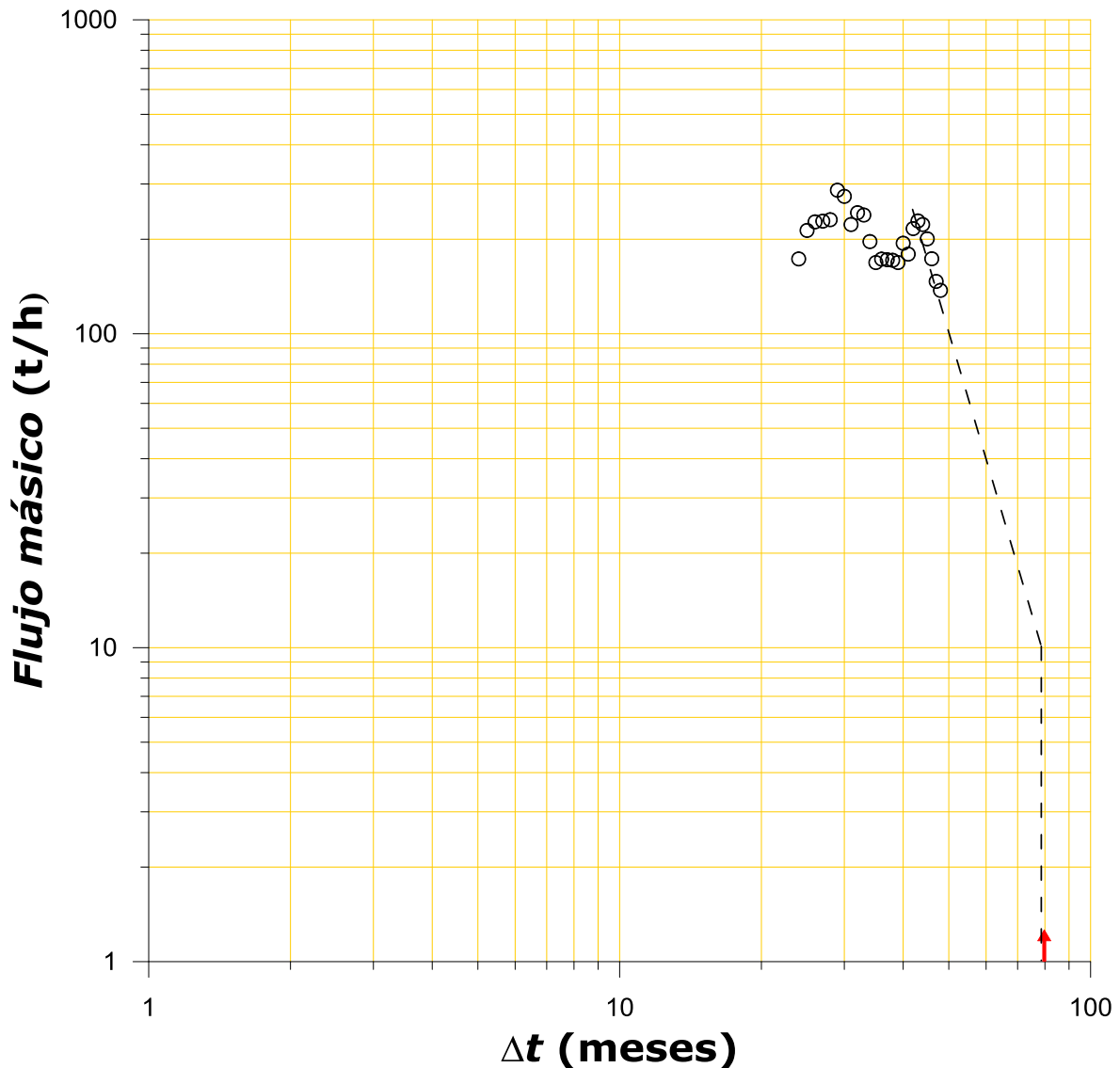
Usando los datos del pozo se construye la gráfica de logaritmo del flujo contra tiempo que se muestra en la Figura 17. Se obtiene el ajuste de los datos a una línea recta correspondiente a la ecuación (3)  $[q = q_i e^{-Dt}]$

y se determina el valor de  $q_i = 211 \text{ t/h}$ . Para determinar el tiempo de vida útil del pozo se usa la gráfica doble logarítmica (flujo contra tiempo) que se muestra en la Figura 18. Para tener un pronóstico realista se utilizan los datos recientes de declinación y se establece un límite económico productivo del pozo. En este caso, el tiempo de vida útil se determina en 78 meses.



**Figura 17.** Gráfica de flujo contra tiempo en escala semilogarítmica para determinar el flujo inicial del pozo de agua (Dursch & Wenclewicz, 2017) a través del ajuste a una línea recta.

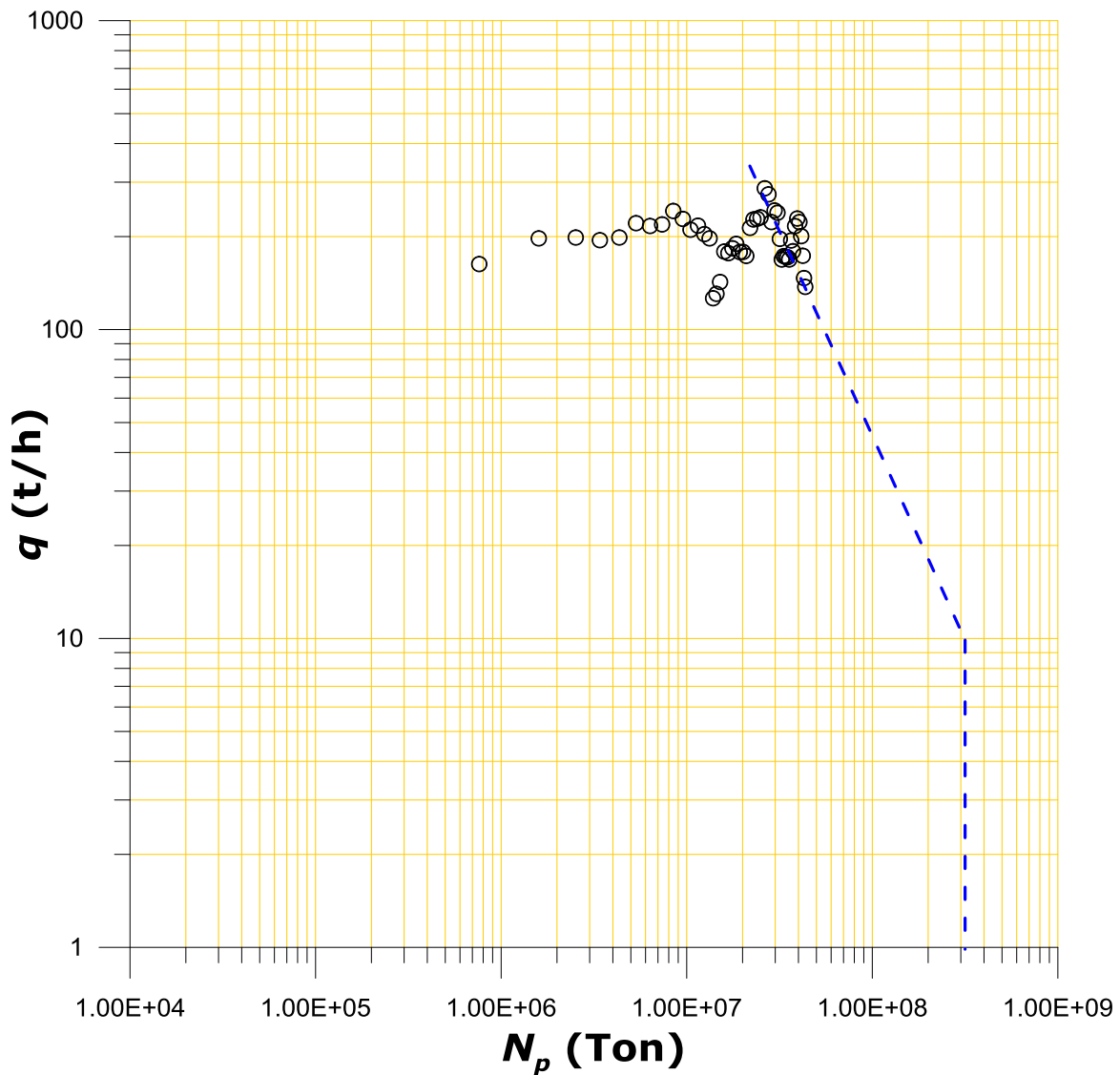




**Figura 18.** Gráfica doble logarítmica (flujo contra tiempo), usando los datos recientes de declinación, para determinar el tiempo de vida útil del pozo de agua (Dursch & Wenclewicz, 2017), estableciendo un límite económico de producción.

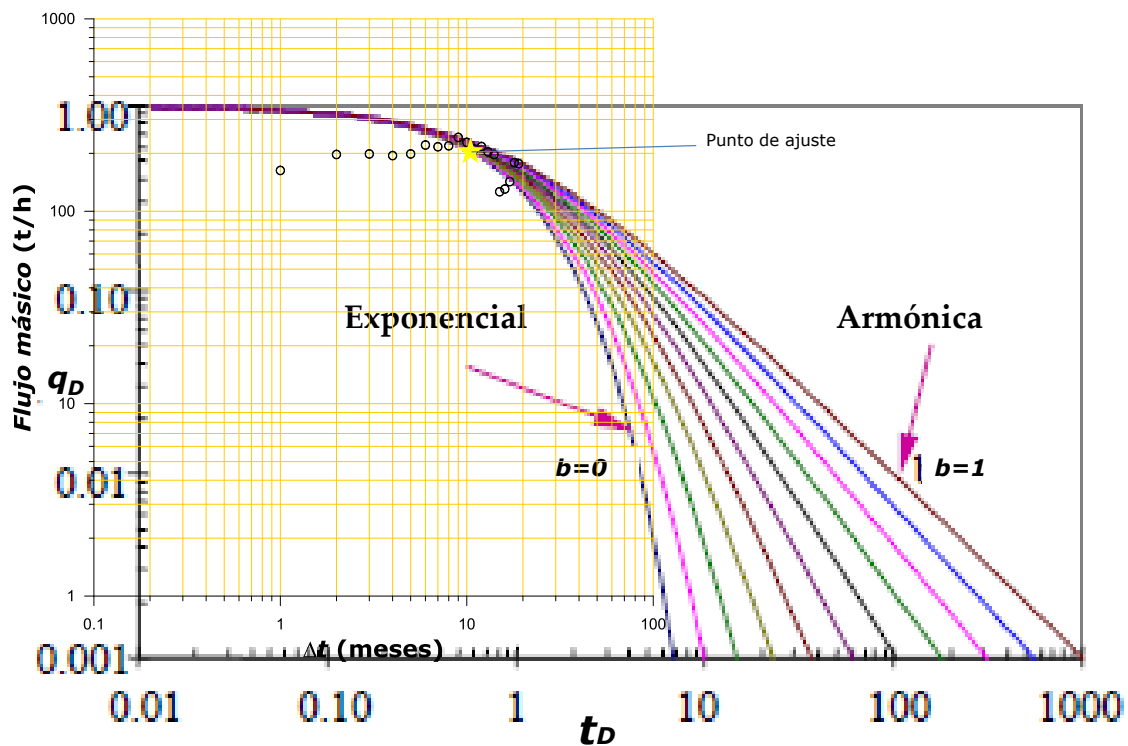
Estableciendo como límite económico de operatividad del pozo 10 (t/h) y usando la técnica doblelogarítmica de la masa producida ( $N_p$ ) respecto al flujo ( $q$ ), se determina la reserva total extraíble del pozo, tal como se

muestra en la Figura 19. Por diferencia entre la masa producida, la reserva máxima, la vida útil y el límite económico se determina la reserva remanente que en este caso resulta ser de 264 MM (ton).

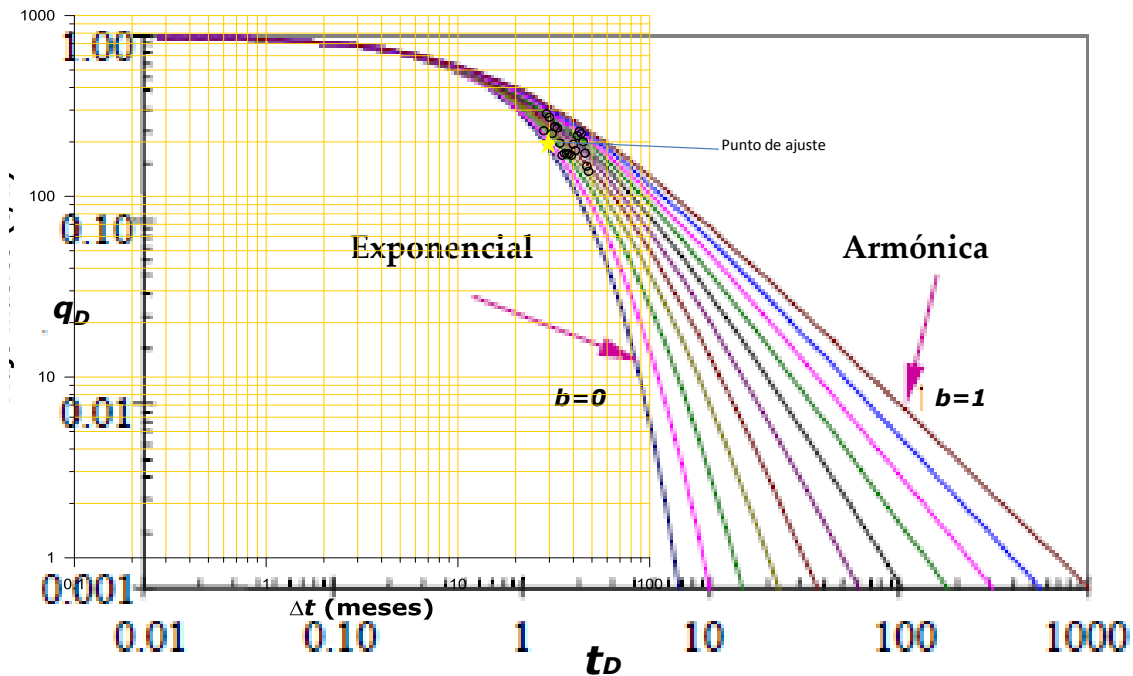


**Figura 19.** Masa producida ( $N_p$ ) respecto al flujo ( $q$ ), para determinar la reserva total extraíble del pozo.

Después de la declinación a tiempo temprano, se desarrollaron actividades en el pozo para mejorar su productividad (Dursch & Wenclewicz, 2017), lo cual resultó en una mejora. Sin embargo el pozo de nuevo mostró una tendencia de declinación un año después (al mes 28). Bajo tales circunstancias, en este trabajo se muestran dos análisis usando la técnica con curvas tipo, que se presentan en la Figura 20 y Figura 21.



**Figura 20.** Datos de producción medidos, a tiempos tempranos en el pozo de agua, ajustados dentro de la curva tipo de declinación propuesta por Fetkovich, (1973).



**Figura 21.** Datos de producción medidos, a tiempos tardíos en el pozo de agua, ajustados dentro de la curva tipo de declinación propuesta por Fetkovich, (1973).

En la Figura 20 se muestra el ajuste con las curvas tipo de análisis, usando los datos de la primera declinación. Mientras que en la Figura 21 se muestra el análisis con curvas tipo para la declinación a partir del mes 28 de vida operativa del pozo.

El ajuste con las curvas tipo de la declinación para el periodo temprano resulta en un diagnóstico con tendencia a una declinación del tipo "armónico". Este comportamiento está vinculado con las características productivas del pozo en relación con su almacenaje y alimentación.

Para el análisis de declinación a tiempo temprano usando los datos sobre la curva tipo y tratando de obtener el mejor ajuste, se tiene que los valores del punto de ajuste que se determinan en cada gráfica son:

Para la gráfica doble logarítmica (datos medidos):  $t = 10$  (meses);  $q = 200$  (t/h).

Mientras que para la curva tipo se tienen  $t_D = 0.40$ ;  $q_D = 0.85$ .

La determinación del flujo volumétrico inicial ( $q_i$ ) se efectúa por medio de la sustitución de los valores anteriores en la ecuación (5). Por lo tanto, se tiene que:

$$q_i = \frac{q}{q_D} = \frac{200}{0.85} = 235 \left( \frac{t}{h} \right)$$

En relación con el gasto inicial ( $q_i$ ) obtenido a partir de la curva tipo es conveniente mencionar la gráfica de la Figura 17. Aún cuando existe dispersión en los valores, se puede estimar un valor inicial del flujo másico ( $q_i$ ) cercano a 211 (t/h), el cual es congruente con el obtenido usando la ecuación (5).

Para tiempos de mayor desgaste del sistema, que en este caso está asociado con la tendencia de declinación del segundo periodo, los puntos de ajuste de los datos del pozo dentro de la curva tipo muestran una tendencia diferente. El ajuste que se logra comparando los datos medidos con la curva tipo muestra una declinación tipo hiperbólica, con coeficiente de declinación  $b = 0.4$ .

Para el análisis de declinación a tiempo tardío, se grafican los datos del pozo sobre la curva tipo, tratando de obtener el mejor ajuste. En este caso se tiene que los valores del punto de ajuste que se determinan en cada gráfica son:

Para la gráfica doble logarítmica (datos medidos):  $t = 30$  (meses);  
 $q = 200$  (t/h).

Mientras que para la curva tipo se tienen  $t_D = 1.6$ ;  $q_D = 0.80$ .

La determinación del flujo volumétrico inicial ( $q_i$ ) se efectúa por medio de la sustitución de los valores anteriores en las ecuaciones (5) y (6), para obtener el flujo y declinación a condiciones iniciales. Por lo tanto, se tiene que:

$$q_i = \frac{q}{q_D} = \frac{200}{0.80} = 250 \left( \frac{t}{h} \right)$$

$$D_i = \frac{t_D}{t} = \frac{11.6}{30} = 0.05 \frac{(t/h)}{\text{mes}}$$

En relación con el gasto inicial ( $q_i$ ) obtenido a partir de la curva tipo es conveniente mencionar la gráfica de la Figura 17. Aun cuando existe dispersión en los valores, se puede estimar un valor inicial del flujo másico ( $q_i$ ) cercano a 250 (t/h), el cual es congruente con el obtenido usando la ecuación (5).

Los resultados de los análisis desarrollados tienen su aplicación práctica en la obtención de criterios técnicos para la formulación de los diseños de la explotación del pozo y su manejo futuro. La Tabla 5 muestra un resumen de resultados de los parámetros principales que sustentan los argumentos para la toma de decisiones. Se tuvo especial cuidado en mostrar los resultados de los análisis de los datos de los pozos utilizados en los ejemplos con sus respectivas unidades de trabajo. Cada columna muestra los parámetros con los que es factible configurar decisiones relacionadas con el manejo del o de los pozos.

**Tabla 5.** Resumen de resultados obtenidos a partir de los análisis de declinación de la producción, los cuales son útiles en la caracterización individual de cada pozo. Donde  $q_i$  = flujo volumétrico;  $W_i$  = flujo másico;  $D_i$  = ritmo de la declinación inicial.

Tipo de pozo	Flujo inicial	$D_i$ ritmo inicial de declinación	Reserva total	Vida útil total	Reserva remanente
Pozo de petróleo	$q_i$ (brl/d)	(brl/d)/mes	(brl)	(meses)	
	2 631	0.24	510 400	161.8	10 750 (brl)
Pozo geotérmico	$W_i$ (t/h)	(t/h)/mes	$10^6$ (ton)	(meses)	$10^6$ (ton)
	64	0.0044	14.8	492	4.794
Pozo de agua	$W_i$ (t/h)	(t/h)/mes	$10^6$ (ton)	(meses)	$10^6$ (ton)
	211	0.053	310	78	264

Dentro de los resultados del análisis de la declinación que se han expuesto es recomendable involucrar también las características petrofísicas de la formación ( $kh/\mu$ ) y  $(\phi C_T h)$  para lograr una

caracterización integral del pozo. En este trabajo se han revisado dos técnicas de análisis: las curvas tipo, y los análisis de la declinación y su aplicación a sistemas de petróleo y geotérmicos. La aplicación de los métodos de análisis a sistemas hidráulicos no representaría complicaciones, pues se trata de fluido en una sola fase.

## Discusión

La adaptación de las ecuaciones de sistemas de petróleo a sistemas geotérmicos e hidráulicos permite alcanzar resultados confiables. Sólo se debe tener cuidado en el manejo consistente de las unidades de trabajo. En el comportamiento que se muestra en la Figura 2 y Figura 3 se puede asumir que existe una respuesta directa del yacimiento. Lo anterior, debido a que los cambios en las pendientes de las gráficas ocurren de manera independiente a las manipulaciones en los diámetros de los orificios de producción.

Se puede observar que en los flujos iniciales ( $q_i$ ,  $W_i$ ) existe congruencia entre los valores medidos y los determinados, usando el método de la curva tipo y la ecuación (6), lo cual sustenta la certidumbre de la metodología. Las determinaciones se hicieron en pozos con diferentes características de fluido, por lo cual, aun cuando la metodología fue desarrollada para pozos de petróleo, con los resultados obtenidos se demuestra factible su aplicación a pozos geotérmicos.

El pozo geotérmico se cerró por un periodo aproximado de 50 meses, identificándose que se superan los efectos transitorios y se obtienen sus condiciones pseudoestables aún después de unos 150 meses de operación continua. Este comportamiento es característico de los sistemas donde hay entrada de recarga. En los sistemas geotérmicos, la fuente de calor es constante, por lo que la entrada de agua representa la recarga. Por lo anterior, el diseño de la explotación está sustentado en el balance entre alimentación de calor, entrada de agua y extracción del flujo másico.

La mayoría de los sistemas geotérmicos son acuíferos abiertos, por lo cual existe entrada de agua de recarga que influye en la presencia de los efectos de almacenaje, los cuales se manifiestan principalmente bajo condiciones estáticas en el pozo. En la gráfica de la Figura 11 se identifican los efectos de almacenaje a la apertura del pozo geotérmico después de un periodo de cierre. Esto es, al abrir de nuevo el pozo se observa que las condiciones del flujo son ligeramente superiores a las que se tenían antes del cierre; sin embargo, al abrir de nuevo el pozo, la declinación resulta con la misma pendiente decreciente. La conjunción de la entrada de agua de recarga y la alimentación de calor son las características base para considerar los sistemas geotérmicos como energía renovable. Un sistema hidráulico se considera renovable al estar siendo alimentado por entrada de agua.

A través de las diferentes etapas del comportamiento de producción, el pozo muestra primero los efectos transitorios y después el estado pseudoestable. Los datos utilizados corresponden a sus condiciones pseudoestables, útiles para la obtención de sus ecuaciones y su extrapolación hacia tendencias futuras de declinación. El valor de 10 ( $t/h$ ) de flujo, asumido como límite económico para un pozo geotérmico, aún representa mucha energía que se puede aplicar en otras formas de aprovechamiento. Lo importante de la metodología es la determinación de la reserva total y remanente, sin importar el límite económico que se establezca.

El tiempo de vida útil de un pozo está ligado a su reserva y la recarga. La ventaja que tienen los yacimientos geotérmicos e hidráulicos sobre los petroleros es que la entrada de agua proporciona recarga que se suma al almacenamiento propio del sistema. Por este motivo, los ritmos de declinación de éstos son menores, en comparación con los de los yacimientos petroleros. Este mismo factor de recarga influye en los tiempos de vida útil de cada sistema. En yacimientos de petróleo, el volumen inicial ya no se modifica con el tiempo, pues no existe generación de nuevos hidrocarburos.

El comportamiento de la productividad del pozo de agua denota una tendencia a declinar por los efectos de los altos contenidos de sales que obstruyen los canales de flujo. Por tal motivo, incluso cuando mostró una mejoría después de haber sido desazolado, después de un tiempo de operación nuevamente mostró declinación.



## Conclusiones

El análisis de la declinación de la producción resulta ser una herramienta útil para caracterización de yacimientos de petróleo, geotérmicos e hidráulicos.

Los parámetros de influencia en el comportamiento de la declinación de los sistemas (tanto petroleros, geotérmicos e hidráulicos) son las propiedades de formación, almacenaje, ritmo de explotación y recarga.

La ventaja de los yacimientos geotérmicos e hidráulicos sobre los de petróleo es la entrada de agua, que representa una recarga sustancial, influyendo en una disminución del ritmo de declinación, prolongando la vida útil y la reserva remanente.

Es importante resaltar que la tendencia de declinación es una característica particular de cada pozo y aun cuando se vea interrumpida por algún factor externo, como intervención, mantenimiento, cierre, reparación, etcétera, al continuar la explotación, la declinación mantendrá su tendencia.

En el análisis de declinación es importante identificar la respuesta del yacimiento, los estados transitorios y la pseudoestabilización.

La combinación apropiada del flujo másico, la producción acumulada y el tiempo son un sustento técnico para extrapolar comportamientos futuros, determinar vida económica útil, reservas extraíbles y reserva remanentes.

Estableciendo los límites económicos de producción de los pozos y del yacimiento se puede determinar su vida útil. Al llegar a las condiciones de los límites económicos se tienen casos críticos, en que los proyectos ya no son rentables.

La correlación de los volúmenes producidos acumulados, los límites económicos y las tendencias de declinación permiten determinar los volúmenes máximos que pueden producir pozos o yacimientos.

La caracterización del comportamiento de cada pozo y su correlación con los límites económicos de producción permite determinar la reserva máxima recuperable y, por lo mismo, la planificación de su explotación.

Los análisis de declinación y sus tendencias futuras sustentan los diseños de producción de los pozos y la toma de decisiones sobre sus posibles intervenciones para mejorar su productividad, así como los proyectos de expansión del campo.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo dentro del Proyecto 14 454 "Técnicas y métodos de análisis, al estado del arte de declinación de la producción en sistemas geotérmicos mexicanos y sus efectos predictivos".

### Referencias

- Agarwal, R. G., Al-Hussainy, R., & Ramey, H. J. Jr. (1970). An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 10(03), 279-290. DOI: 10.2118/2466-PA
- Agarwal, R. G., Gardner, D. C., Kleinsteiber, S. W., & Fussel, D. (1999). Analyzing well production data using combined type curve and decline curve analysis concepts. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2(05), 478-486. DOI: 10.2118/57916-PA
- Aragón-Aguilar, A., Barragán, R. R., Arellano, G. V. (2013). Methodologies for analysis of productivity decline: A review and application. *Geothermics*, 48, 69-79. DOI: 10.1016/j.geothermics.2013.04.002
- Arellano, G. V., Torres, M. A., & Barragán, R. M. (2005). Thermodynamic evolution of the Los Azufres México geothermal reservoir, from 1982 to 2002. *Geothermics*, 34(5), 592-616. DOI: 10.1016/j.geothermics.2005.06.002
- Arps, J. J. (1945). Analysis of decline curves. *Transactions of the AIME*, 160(01), 228-247. DOI: 10.2118/945228-G

- Arps, J. J. (1956). Estimation of primary oil reserves. *Petroleum Transactions, AIME*, 207, 182-191.
- Bahadori, A. (2012). Analysis gas well production data using a simplified decline curve analysis method. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(4), 541 – 547. DOI: 10.1016/j.cherd.2011.08.014
- Blasingame, T. A., McCray, T. L., & Lee, W. J. (enero, 1991). Decline curve analysis for variable pressure drop/variable flow rate systems. En: *Gas Technology Symposium*, Society of Petroleum Engineers, Houston, Texas, 22-24 de enero. DOI: 10.2118/21513-MS
- Cárcamo, T. E., & Polo, N. G. (2007). *Metodología para la predicción de curvas de declinación de pozos de petróleo aplicando redes neuronales artificiales* (tesis de licenciatura). Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.
- Dursch, G. L., & Wenclewicz, M. (2017). *2016 Water production annual report, City of Oakwood* (pp. 14). Ohio, USA: Ohio Department of Natural Resources.
- Earlougher, R. C., & Kersh K. M. (1974). Analysis of short-time transient test data by type-curve matching. *Journal of Petroleum Technology*, 26(07), 793-800. DOI: 10.2118/4488-PA
- Fetkovich, M. J. (1973). The isochronal testing of oil wells. *SPE 4529 48<sup>th</sup> Annual Technical*. Conferencia llevada a cabo del 30 de Sept. al 3 de Oct, por la Society of Petroleum Engineers, Las Vegas, Nevada, USA.
- Fetkovich, M. J. (1980). Decline curve analysis using type curves. *Journal of Petroleum Technology*, 32(06), 1065-1077. DOI: 10.2118/4629-PA
- Fetkovich, M. J., Fetkovich, E. J., & Fetkovich, M. D. (1994). Useful concepts for decline forecasting reserve estimation and analysis. *60<sup>th</sup> Annual Technical Conference SPE*. Conferencia llevada a cabo por la Society of Petroleum Engineers, Nueva Orleans, Luisiana, USA.
- Gaskari, R., Mohagheghi, S. D., & Jalali, J. (mayo, 2006). An integrated technique for production data analysis with application to mature fields. *Gas Technology Symposium*. Llevado a cabo del 15-17 de

- mayo por la Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, Canada. DOI: 10.2118/100562-MS
- Golan, M., & Whitson, C. H. (2003). *Well performance* (2a ed.). Trondheim, Noruega: Tapir Akademiske Forlag.
- Gunn, C., & Freeston, D. (1991). An integrated steady-state wellbore simulation and analysis package. *Proceedings of the 13th New Zealand Geothermal Workshop*. Llevado a cabo por Geothermal Institute, The University of Auckland, New Zealand.
- Mata, D., Gaskari, R., & Mohagheghi, S. D. (octubre, 2007). Field wide reservoir characterization based on a new technique of production data analysis: Verification under controlled environment. *Eastern Regional Conference and Exhibition*. Llevada a cabo el 17-19 de octubre por la Society of Petroleum Engineers, Lexington, Kentucky, USA. DOI: 10.2118/111205-MS
- Sanyal, S. K., Menzies, A. J., Brown, P. J., Eney, K. L., & Eney, S. (1989). A systematic approach to decline curve analysis for the Geysers steam field, California. *Geothermal Resources Council Transactions*, 13, 415-421.
- Shahamat, M. S, Hamdi, H., Mattar, L., & Aguilera, R. (2016). A novel method for performance analysis of compartmentalized reservoirs. *Oil and Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies Nouvelles*, 71(3). DOI: 10.2516/ogst/2015016
- Slider, H. C. (1983). *Worldwide practical petroleum reservoir engineering methods*. Oklahoma, USA: Penn Well Books.

**Early estimation of the wheat crop yield in irrigation  
district 038, Río Mayo, Sonora, México**  
**Estimación temprana del rendimiento de la cosecha de  
trigo en el distrito de riego 038, Río Mayo, Sonora,  
México**

Enrique Palacios-Vélez<sup>1</sup>

Luis Palacios-Sánchez<sup>2</sup>

José Luis Espinosa-Espinosa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Water Science Department, Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco km 36.5, Municipio Texcoco, Estado de México, MÉXICO, epalacio@colpos.mx

<sup>2</sup>Manager of "Servicios de Estudios en Ingeniería y Sistemas", S. A. de C. V., El Sol 11, Colonia Alameda, Hermosillo, Sonora, MÉXICO, luispalacios@seissa.com.mx

<sup>3</sup>Water Science Department, Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco km 36.5, Municipio Texcoco, Estado de México, MÉXICO, espinosa.jose@colpos.mx

Author for correspondence: Enrique Palacios-Vélez, epalacio@colpos.mx

**Abstract**

In Irrigation District No. 38, Río Mayo, in the state of Sonora, México, wheat cultivation represents around 70 % of the area under irrigation (around 68,000 ha), so several studies have been performed with the aim of relating the crop yields with values of the NDVI index obtained from images by satellites Landsat 7, Landsat 8 and Deimos, as well as with estimations of evapotranspiration of the crops (ETc), evaluated

through two methods, with the  $ET_c = K_{cb} * ET_r$  relation ( $ET_r$ , Reference evapotranspiration), where  $K_{cb}$  is estimated as a function of the NDVI index, and through the MATRIC moisture balance method. Specifically, for the early estimation, a relationship between the yield and the value obtained with the NDVI index during the crop's flowering has been considered, a time when it generally achieves its highest value and because there are enough antecedents in the literature, among them studies performed by the International Water Management Institute and "Colegio de Postgraduados", which stand out. However, this NDVI value is not enough for the estimation, so the value accumulated from heat units can be used, as will be shown in this article. On the other hand, in order to communicate the conditions of their crops to agricultural producers, viewers have been built, accessible through the Internet or local networks. Also, as part of the PLEIADeS and SIRIUS projects, financed by the European Commission, where the authors collaborate, the SPIDER viewer was created, which allows observing the NDVI and  $ET_c$  values in each plot, although there are others, one designed by one of the authors and another by a doctoral student from Colegio de Postgraduados; the latter is installed in the Irrigation District. To calibrate the methodology proposed in estimating the probable yield, operations staff from the irrigation district performed measurements of the yields in several plots, with the objective of finding a function between the yields and the NDVI values during the crop's flowering.

**Keywords:** NDVI, heat units, evapotranspiration, remote sensors.

Received: 26/05/2016

Accepted: 26/07/2018

## Background

In Report No. 28 of the International Water Management Institute (IWMI), related with the evaluation of irrigated area in the Bhakra irrigation system in India (R. Sakthivadivel *et al.*, 1999), using remote sensors and geographic information systems (GIS), a classification of

the productivity of the land is made by using satellite images with which the values of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) are calculated, and they are related with yields from the wheat crop, which dominates this irrigation system of 1.3 million hectares.

The basis of this evaluation is the relationship between the fraction of the photosynthetically active radiation and the crop's yield. Indeed, this radiation called PAR describes the radiation available for the vegetation's photosynthesis process. On the other hand, the fraction of solar radiation absorbed by the chlorophyll pigments (fPAR) describes the energy related with the assimilation of carbon dioxide and is derived from the PAR absorbed by the vegetative canopy, divided by the PAR available from sun radiation. It is assumed that fPAR is worth zero for the bare soil.

In this report, it is assumed that the photosynthetically active radiation absorbed by the crop (APAR) is related with the sum in time of the fPAR whose units are: ( $\text{J m}^{-2} \text{t}^{-1}$ ). It is also pointed out that APAR is the main parameter that controls the total biomass accumulated by the crop, so that the yield can be present as the following function:

$$Y = z\eta APAR \quad (1)$$

Where  $Y$  is the grain yield in the crop and  $z$  is the relationship between the grain yield and the total biomass, and  $\eta$  ( $\text{kg/J}$ ) is the efficiency of photosynthesis depending on the type of route for carbon fixation ( $\text{C}^3$ ,  $\text{C}^4$ , or  $\text{CAM}^4$ ) (Prince 1991). The validity of the equation (1) has been proven by Monteith (1972), and experimentally by Daughtry *et al.* (1992), Field, Randerson and Malmstorm (1995) and Morel *et al.* (2014).

$$\text{Then: } fPAR = a + b * NDVI_t \quad (2)$$

Where  $a$  and  $b$  are constants and NDVI is an expression directly linked with the crop's yield. Based on this report, there is reference to several studies where the value of NDVI in anthesis (crop heading stage) is related, in order to estimate the crop's yield, because in this stage an evaluation of the final yield of the crop can be made; in this regard, they

mention the study by Pestamalci *et al.* (1995). However, in México a good linear relation was obtained between the yield in barley and the NDVI value in this stage of the crop's development (Ruiz Huanca Paulino *et al.*, 2005).

For the case of wheat in India, the function found was the following:

$$Y = 10.99 \text{ NDVI} - 3.75 \quad (3)$$

With  $R^2 = 0.8594$  and standard error of 0.217 t/ha.

For the case of barley in México, the equation found was:

$$Y = 11.48 \text{ NDVI} - 0.882 \quad (4)$$

with  $R^2 = 0.8846$

In México also, a function for wheat in the south of the state of Sonora has been found, with a similar structure:

$$Y = 12.88 \text{ NDVI} - 4.13 \quad (5)$$

with  $R^2 = 0.873$  and standard error of 0.495 t/ha.

## Materials and methods

The study research was performed in Irrigation District number 038, "Río Mayo", in the south of the state of Sonora, located at coordinates -109.7873 W, 27.2912 N upper left corner and -109.2159 W and 26.7059 N lower right corner; it is irrigated with water from the "Adolfo Ruiz Cortínez" dam and 130 wells. The irrigable surface is 98,520 ha.

In this district, the geographic information system (GIS) is available with 15,022 plots detected, and it is divided into 16 irrigation modules,



which are managed by 16 Water Users' Associations (WUA) and a Limited Liability Society, which oversees the operation and maintenance of the infrastructure of the major network of canals, drainage and structures.

During the last four agricultural cycles, follow-up of the surface irrigated has been performed through monitoring with satellite images by Landsat 7, Landsat 8, and in a few months with Deimos 1 and RapidEye. To perform this monitoring, the NDVI (normalized difference vegetation index, Rouse *et al.*, 1974) has been calculated, and the MSI (moisture stress index, Rock *et al.*, 1986), using the corresponding reflectance calculated from satellite images, to which an atmospheric correction was applied and a multi-sensor normalization. In addition, the evapotranspiration of crops has been estimated as:

$$ET_c = K_c * ET_r \quad (6)$$

Where  $ET_c$  is the crop's evaporation and  $ET_r$  is the evapotranspiration of reference, generally estimated through the Penman-Monteith equation, and the calculation of basal  $K_c$  as an empirical linear function of the NDVI (D'Urso and Calera, 2005, Calera et al, 2017).

The functions mentioned are:

$$NDVI = \frac{\rho_i - \rho_r}{\rho_i + \rho_r} \quad (7)$$

Where:  $\rho_i$  close infrared reflectance and  $\rho_r$  reflectance in red

$$MSI = \frac{\rho_i}{\rho_{im}} \quad (8)$$

Where:  $\rho_i$  close infrared reflectance and  $\rho_{im}$  mid-infrared.

$$K_c = 1.26 NDVI - 0.2 \quad (9)$$



$$\frac{dy}{dt} = k(Y_m - y)y \quad (10)$$

For the Gompertz model it is:

$$\frac{dy}{dt} = -k[\ln Y_m - \ln y]y \quad (11)$$

Where  $y$  is the dependent variable which, for this case, could be the amount of biomass,  $t$  the development time,  $k$  a constant of proportionality, and  $Y_m$  the maximum value that the  $y$  variable reaches.

When integrating, the following functions are obtained:

$$y = \frac{Y_m}{1 + \frac{Y_m - y_0}{y_0} \exp(-ct)}$$

Which can appear as

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(-ct)} \quad (12)$$

$y_0$  is the initial value of the variable, which from (12) for  $t = 0$  is worth:

$$y_0 = \frac{a}{1 + b}$$

For the Gompertz function it is:

$$y = Y_m \exp[-\exp(b - kt)]$$

Which usually appears as:

$$y = a \exp[-\exp(b - ct)] \quad (13)$$

The growth rate is also usually used in both cases, based on functions (10) and (11); these rates that are presented as a bell function have a maximum value at the inflection point and are a good indicator of when the maturation and senescence of the crop begin. For the case of the Logistic function, the maximum value is reached at a time

$$t_m = \frac{1}{-c} \ln \left[ \frac{1}{b} \right] \quad (14)$$

For the case of the Gompertz function, this value is reached when

$$t_m = \frac{b}{c} \quad (15)$$

Specifically, for the case in consideration, it was seen that a better adjustment was achieved with the Logistic function, usually with values of the determination coefficient  $R^2$  higher than 0.99 and standard errors below 0.205 in the NDVI.

With regard to access to graphic satellite information by users of the Río Mayo irrigation district, they can enter the Web and see the state of their plots. First, they could access the information through the viewer generated in the PLEIADeS and SIRIUS projects, with servers in Spain, but since these projects are finished, another one was developed by "Colegio de Postgraduados" as part of a Master's thesis, which is installed in the irrigation district of study.

Finally, in order to have another tool that allows performing an early estimation of yield, the heat units (Growing Degree Days: GDD) in Celsius degrees will be used, which allow evaluating the energy accumulated, from sowing to flowering, as well as the total accumulated until the end of maturation.

The climate information is obtained from INIFAP's automatic station in the irrigation district's center, for the whole period of crop development, daily, from October to May, by the state network of meteorological stations (*Patronato para la Investigación y Experimentación Agrícola del Estado de Sonora*) at: <http://pieaes.dyndns.org/>.

## Results

During the last four agricultural cycles: 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014 and 2014-2015, measurements were made of the wheat yield through sampling in several of the district's irrigation modules, where this crop predominates, occupying between 75 % and 80 % of the module's surface. In the first two cycles, a good relation was found between the maximum level of the NDVI and the average wheat yield; however, in the 2013-2014 cycle a small decrease was observed in the yield with regard to the expected one in agreement with function (5), but for the 2014-2015 agricultural cycle, the decrease in yield was highly significant, and the differences estimated in 6 of the modules evaluated varied between 20 % and 30 % less than in 2013-2014.

For the case of module 15, the estimation of the average wheat yield in the module was obtained through average value sampling of 6.91 t/ha in 2013, 6.62 t/ha in 2014 and 5.19 t/ha in 2015, a reduction of 1.72 t/ha equivalent almost to 25% of the yield obtained in 2013.

To understand the differences observed, the average NDVI values observed were graphed against the Heat Units: Growing Degree Days (°C) and the values for the maximum NDVI each year were also graphed against the yields as shown in Figure 2 (Parthasarathi et al, 2013).

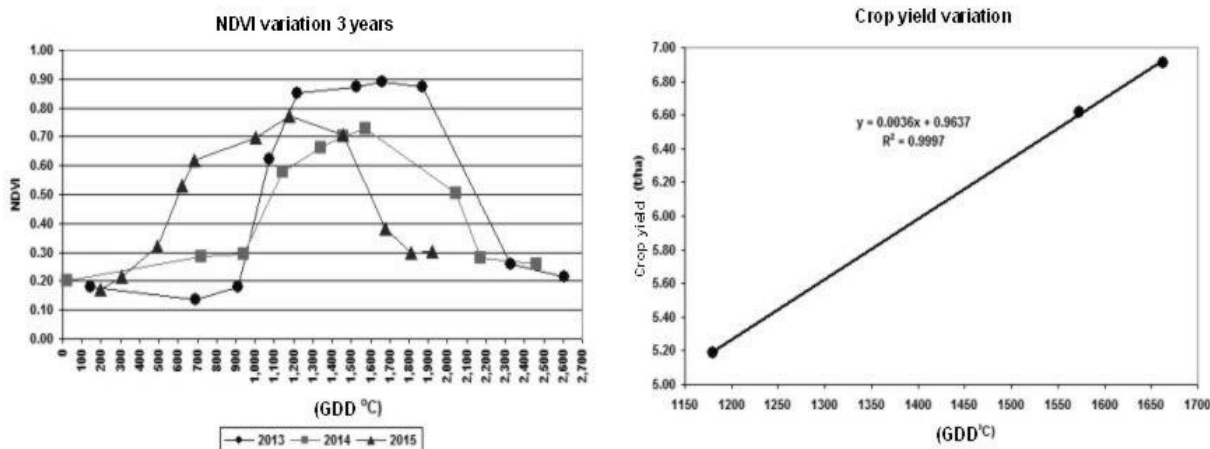


Figure 2. Comparison of the NDVI values and yields against heat units.

As complement to this figure, Table 1 shows a summary of the information that can be obtained with it.

**Table 1.** Information on Module 15

Year	Max NDVI	GDD. total	Yield. t/ha	Max Day NDVI	GDD Max Val.
2013	0.89	2331	6.91	128	1663
2014	0.73	2169	6.62	144	1573
2015	0.77	1809	5.19	96	1180

From Figure 2 and Table 1, it is deduced that the accumulation of Heat Units when the maximum value of the NDVI was present was reduced significantly in 2015 as compared to the prior years, and the same happens with the total HUs accumulated at the end of the crop, when the NDVI values reach a minimum of 0.3. These decreases imply that the crop did not accumulate enough energy to attain higher yields.

An analysis of the crop's behavior was also performed in other modules where wheat is the predominant crop, Modules 5, 6, 10 and 13, whose results are shown summarized in Table 2 presented next.

**Table 2.** Information about the yield variation in 5 Modules.

Module	Year	GDD at NDVI max	Total GDD	Yield t/ha	Yield dif.
Mod_05	2014	1573	2169	6.24	
Mod_05	2015	1006	1678	4.81	1.43
Mod_06	2014	1573	2463	6.51	
Mod_06	2015	1180	1809	5.42	1.09
Mod_10	2014	2046	2464	7.08	
Mod_10	2015	1180	1921	5.19	1.89
Mod_13	2014	1573	2464	6.83	
Mod_13	2015	1180	1809	4.68	2.15
Mod_15	2014	1573	2169	6.62	
Mod_15	2015	1180	1809	5.19	1.43

As can be observed in this table, there was a significant reduction of the yields in every case, in all the irrigation Modules considered; in the case of Module 13, the reduction was almost a third of the yield obtained in 2014.

In general, there was a significant reduction of the Heat Units, which indicates a lower accumulation of energy in the crop, generating the yield reduction. To analyze the yield reduction in more detail, a more specific analysis for the case of Module 15 has been performed, where there is good information about the yields because the sampling was broader and more careful as a result of the participation of its directors who are producers that rent considerable surfaces.

For this case, modeling of the crop growth was performed, using the NDVI indexes accumulated, adjusting the variation to a sigmoid function of the Logistic type, and the rates of wheat crop growth were calculated for each one of the three years when their yields were available.

Adjustment of the values accumulated to a Logistic or Gompertz function was tested. The data were adjusted better to the Logistic model.

For 2013, the model:  $y = \frac{5.479}{1 + 33.638 * \exp(-0.0298 * t)}$  with  $R^2 = 0.9916$

Standard Error= 0.202

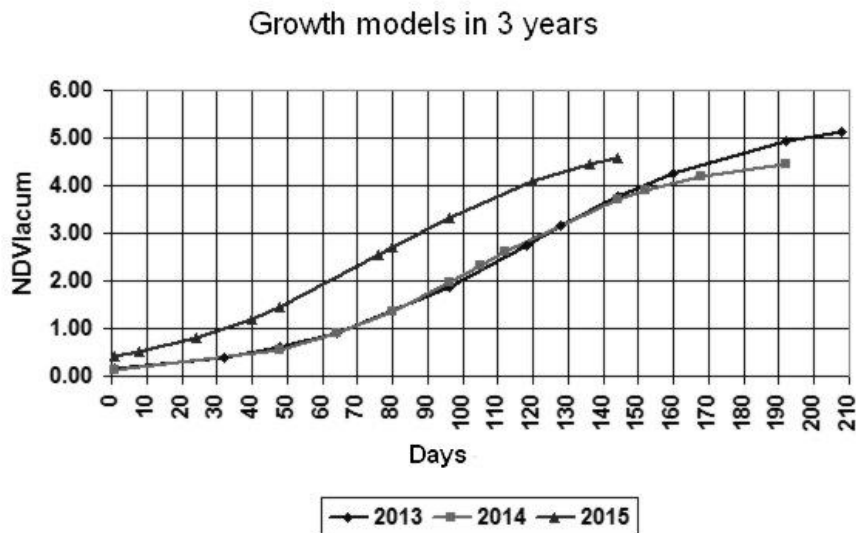
For 2014, the model:  $y = \frac{4.672}{1 + 40.137 * \exp(-0.035 * t)}$  with  $R^2 = 0.994$

Standard Error =0.128

For 2015, the model:  $y = \frac{5.105}{1 + 11.769 * \exp(-0.032 * t)}$  with  $R^2 = 0.989$

Standard Error =0.201

In Figure 3, the curves generated with these functions have been graphed, showing that the longer the crop lasts, there was higher yield; it should be noted that in 2013, there was a longer duration of the crop than in 2015, and in 2014 it can be appreciated that there is an intermediate value.

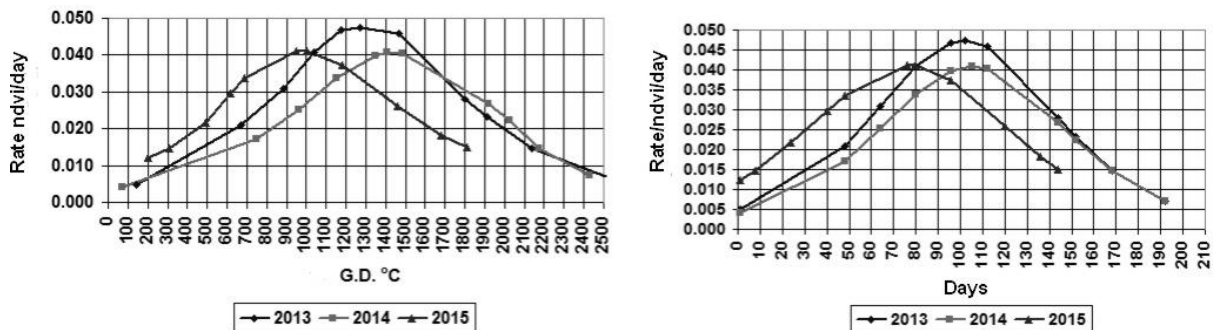


**Figure 3.** Adjustment of a Logistic function of accumulated NDVI values.

When calculating the growth rates of the wheat crop in these three years, it is observed that the values of the Heat Units for maximum NDVI value each year have differences, which are accentuated significantly between 2013 and 2015, as is shown in Figure 4, where in



In addition to graphing the rates with regard to the HU, it has also been done in days. In both cases, the difference between 2013 and 2015 can be noted.



**Figure 4.** Growth rates of the NDVI accumulated in three years, Module 15.

In the figures it can be seen that the growth rates in years 2013 and 2014 show certain similarities, with the variant of a higher maximum value in 2013; however, it is evident that the 2015 curve is completely out of phase, the maximum value happened prematurely, which agrees with the position of the NDVI values of the images shown in Figure 2.

The reason of the notable variation observed in the year 2015, among other variant meteorological conditions, was observed in this year, with many cloudy days, which probably generated a greenhouse effect, accelerating the development of the crop and preventing energy accumulation from happening, which is noted in the lower accumulation of HU.

When calculating the average evapotranspiration for module 15, it is observed that in spite of the differences in the crop's development, the evapotranspiration in year 2013 was virtually equal to that in 2015, of around 390 mm, which implies that the daily evapotranspiration rate in 2015 was higher; this fact can also explain the greenhouse effect generated by cloudiness, which accelerated the crop's growth.

## Conclusions

It can be concluded that under “normal” meteorological conditions, an estimate of the yield value can be made based on the maximum NDVI value observed, which generally agrees with the time when anthesis happens, or flowering of the crop, as has been shown in the studies developed in different parts of the world, among which it can be seen in India and México.

However, a very fast growth of the biomass does not allow accumulating enough energy and, therefore, a decrease in yield can be expected, which could be proportional to the deviation observed in HU and even simply in days, with regard to the more frequent or “normal” value. Thus, an early estimation of the yield could be performed based on the maximum level of the NDVI, corrected in function of the date of its presentation, which allows evaluating the heat units accumulated.

Naturally, this work will require testing in other sites and possibly with more measurements to have a greater certainty about these conclusions. It is worth mentioning that there is more detailed information regarding the yield values in several plots, primarily in irrigation modules 13 and 15, with which a thesis study is being carried out to corroborate the prior results that are presented in this article.

## Aknowledgments

We would like to thank the producers and directors of the irrigation modules that have supported this work, as well as the directors and technicians of the *S. de R. L. del Distrito de riego del Río Mayo*, for their support and participation to carry out the measurements in many plots sown with wheat during the agricultural cycles considered in this study.

## References

- Calera, A., Campos, I., Osann, A., D’Urso, G. and Menenti, M. 2017. “Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modelling to Services for the End Users”. *Sensors*, 17, 1104, 25 pp.

- Daughtry, C. S. T., K. P. Gallo, S. N. Goward, S. D. Prince, and W. P. Kustas. 1992. "Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies". *Remote Sensing of Environment* 39:141–152.
- G. D'Urso and A. Calera Belmonte. 2005. "Operative approaches to determine crop water requirements from Earth observation data: Methodologies and applications". AIP Conference Proceedings. Naples, Italy.
- Field, C. B., J. T. Randerson, and C. M. Malmstorm. 1995. "Global net primary production: Combining ecology and remote sensing". *Remote Sensing of Environment* 51:74–88.
- Jensen R. John. 2007. "Remote sensing of the environment, an earth perspective" Second Edition, Prentice Hall Series in Geographic. Keith C. Clarke Series Editor.
- Monteith, J. L. 1972. "Solar radiation and productivity in tropical ecosystems". *Journal of Applied Ecology* 9:1,137–1,143.
- Morel, J., Todoroff, P., Bégué, A., Bury, A., Martiné, J-F. and Petit M. 2014. "Toward a Satellite-Based System of Sugarcane Yield Estimation and Forecasting in Smallholder Farming Conditions: A Case Study on Reunion Island". *Remote Sensing* 6, 6620-6635.
- Parthasarathi, Y., Velu, G. and Jeyakumar, P. 2013. "Impact of Crop Heat Units on Growth and developmental Physiology of Future Crop Production: A Review". *Research & Reviews: A Journal of Crop Science and Technology*. 2:1, 1-11
- Pestemalci, V., U. Dinc, I. Yegingil, M. Kandirmaz, M. A. Cullu, N. Ozturk, and E. Aksoy. 1995. "Acreage estimation of wheat and barley fields in the province of Adana, Turkey". *International Journal of Remote Sensing* 16(6): 1,075–1,085.
- Prince, S. D. 1991. "A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data". *International Journal of Remote Sensing* 12(6): 1,313–1,330.
- Rock, B. N., J. E. Vogelmann, D. L. Williams, A. F. Voglemann and T. Hoshizaki. 1986. "Remote Detection of Forest Damage". *Bio Science*, 36:439 pp.
- Rouse J. W., R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering. 1974. "Monitoring Vegetation System in Great Plains with ERTS."

Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1".  
Symposium, Greenbelt: NASA, SP-351,3010-317.

Ruiz-Huanca P., E. V. Palacios, E. S. Mejia, A. G. Exebio, J. L. Oropeza  
and M. G. Bolaños. 2005. "*Estimación Temprana del Rendimiento de  
la Cebada Mediante el Uso de Sensores Remotos*". Terra  
Latinoamericana, 23: 167-178.

Sakthivadivel R. G., S. Thirunvengadatchari, Upai Amerasinghe, W. G.  
M. Bastiaanssen, and D. Molden. 1997. "*Evaluation of the Bhakra  
Irrigation System, India, Using Remote Sensing and GIS  
Techniques*". International Water Management Institute. Colombo, Sri  
Lanka.

Thornley J. H. M. 1976. "*Mathematical Models in Plant Physiology*".  
Academic Press, New York.

Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E.A., Vos, J.; Spiertz, J.H.J. 2003. "A  
Flexible Sigmoid Function of Determinate Growth". *Annals of Botany*  
9, 361 - 371

**Cuantificación de la constante de desoxigenación por demanda bentónica del río Tercero (Ctalamochita), provincia de Córdoba, Argentina**

**Measurement of sediment oxygen demand rates for benthic demand of Tercero (Ctalamochita) River, Córdoba province, Argentina**

María Laura Chalimond<sup>1</sup>

Marina Ferreyra<sup>2</sup>

Ana María Cossavella<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación, Córdoba, Argentina, mlaura.chali@gmail.com

<sup>2</sup>Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación, Córdoba, Argentina, marinaferreyra69@gmail.com

<sup>3</sup>Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación, Córdoba, Argentina. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, acossav@gmail.com

Autor para correspondencia: María Laura Chalimond, mlaura.chali@gmail.com

## Resumen

La modelación del oxígeno disuelto de un río constituye una valiosa herramienta en la evaluación de su calidad. De allí la importancia de valorar los distintos procesos involucrados, entre ellos la demanda bentónica, es decir, el consumo de oxígeno de la columna de agua en la

interfaz agua-sedimento. Considerando que no se dispone de ningún estudio experimental referido a este tema para el río Tercero (Ctalamochita), Córdoba, Argentina, este trabajo tiene como objetivo cuantificar a nivel de laboratorio su demanda bentónica en ocho sitios a lo largo de su cauce, a partir de muestras de sedimento tomadas en cinco campañas efectuadas entre junio de 2013 y junio de 2014, empleando respirómetros individuales. Teniendo en cuenta la variabilidad del oxígeno disuelto en función del tiempo, el volumen de agua confinada, la superficie del sedimento y las características de los respirómetros, se calculó la demanda bentónica, aplicando la ecuación utilizada por Nolan y Johnson (1979), propuesta por USEPA. La falta de antecedentes para el río en estudio imposibilitó comparar los resultados obtenidos; sin embargo, el intervalo de valores hallados a 20 °C estuvo comprendido entre 0.040 y 0.484 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d, siendo similares a los reportados por USEPA para sedimentos minerales y arenosos de ríos (0.05-1.00 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d). Los resultados obtenidos permiten comprender el comportamiento del sedimento béntico y su influencia en el oxígeno disuelto del cuerpo hídrico en estudio.

**Palabras clave:** Demanda bentónica, respirómetros individuales, oxígeno disuelto, río Tercero (Ctalamochita).

### Abstract

Modeling of dissolved oxygen technique in rivers is a valuable tool for assessing water quality. Hence, assessment of different processes is of great importance, like benthic demand, that is to say, oxygen consumption of the water column in the water-sediment interface. At the moment there are no previous studies related to this field for the Tercero (Ctalamochita) River (Córdoba, Argentina). The aim of this study was to measure the benthic demand of Tercero (Ctalamochita) River from sediment samples that were taken at eight sites in five campaigns during one year (June, 2013 to June, 2014), using individual respirometers. Taking into account the variation of the dissolved oxygen as regards time, water volume, sediment area and characteristics of respirometers, benthic demand was estimated using the equation of Nolan and Johnson, (1979) proposed by the USEPA. Since there is no previous data, it was impossible to compare the acquired results.

However, the range values found at 20 °C was between 0.040 and 0.484 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d, being similar to those reported by the USEPA for mineral and sandy river sediments (0.05-1.00 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d). These results allow us to understand the behavior of benthic sediment and its influence on the dissolved oxygen.

**Keywords:** Sediment oxygen demand, individual respirometers, dissolved oxygen, Tercero (Ctalamochita) River.

Recibido: 07/07/2015

Aceptado: 30/07/2018

## Introducción

Al evaluar la calidad de un río resulta relevante la modelación del oxígeno disuelto (OD), considerando los diferentes procesos que aportan y consumen oxígeno; entre estos últimos se encuentra la demanda bentónica (SOD, del inglés *Sediment Oxygen Demand*), definida como el consumo de oxígeno disuelto de la columna de agua debido a la combinación de procesos biológicos, bioquímicos y químicos en la interfaz agua-sedimento (Lee & Jones-Lee, 2000).

## Objetivos

- Proponer una guía metodológica para determinar la demanda bentónica empleando respirómetros individuales.

- Cuantificar la constante de desoxigenación por demanda bentónica del río Tercero (Ctalamochita) en sitios localizados aguas arriba y aguas abajo de las descargas de líquidos residuales que recibe.

## Área de estudio

El río Tercero (Ctalamochita), uno de los más importantes de la provincia de Córdoba, nace en el embalse Piedras Moras y desde allí recorre en sentido oeste-este unos 300 km de territorio a lo largo de la provincia, siendo afluente indirecto del río Paraná, perteneciente a la cuenca del Plata. A lo largo de su recorrido es utilizado para abastecimiento de agua potable, riego, uso industrial e hidroeléctrico. Su principal fuente de contaminación proviene de la urbanización cercana a su cauce y su empleo como cuerpo receptor de efluentes de diferentes industrias, además de las descargas cloacales de cuatro plantas depuradoras, provenientes de las ciudades Río Tercero, Villa María, Bell Ville y Monte Buey, y un canal de líquidos pluviales que atraviesa una cuenca agrícola ganadera (canal derivador o desviador Bell Ville) (Cossavella *et al.*, 2013).

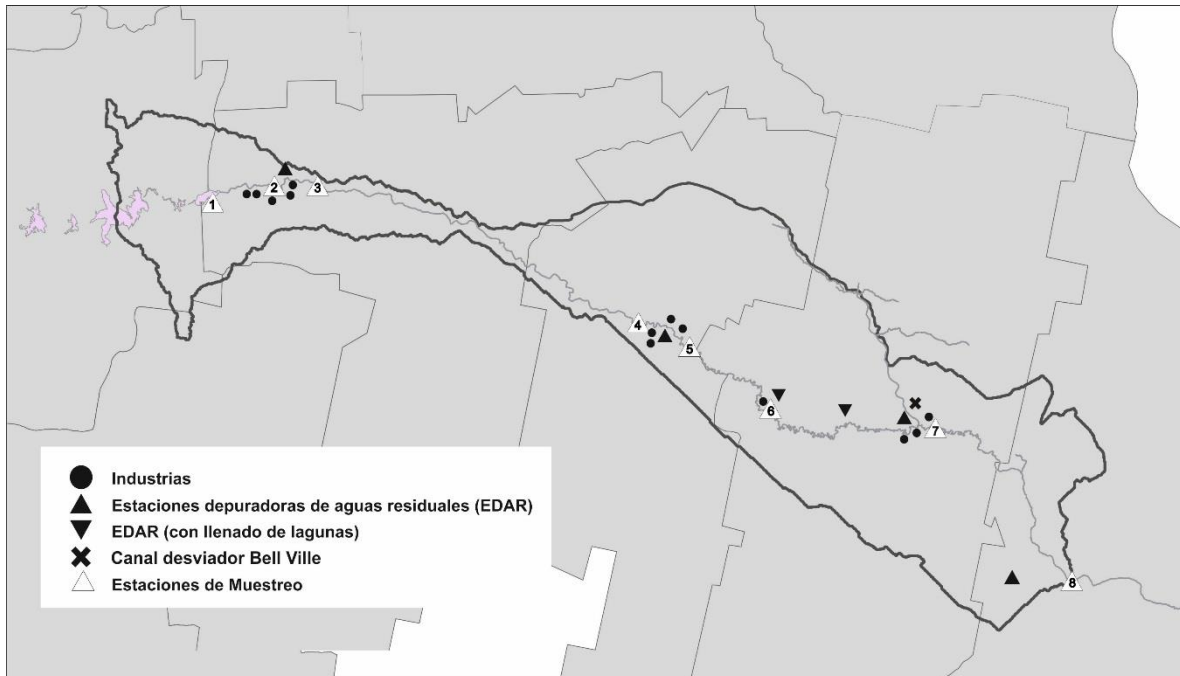
## Materiales y métodos

### Estaciones de monitoreo y toma de muestras



Se definieron ocho sitios (Figura 1) para el muestreo de sedimento en función de las características físicas del área, la velocidad del flujo del curso de agua, la posibilidad de tener acceso en forma segura a las márgenes y usos del río, en particular descargas de líquidos residuales:

1. Balneario Almafuerte (BA) (S 32° 10' 11" W 64° 15' 59"), a 2 km del embalse Piedras Moras; recibe el agua directamente de éste.
2. Balneario Río III (BIII) (S 32° 09' 36" W 64° 06' 40"), luego del vertido de efluentes de un importante polo industrial.
3. Puente Los Potreros (PLP) (S 32° 09' 29" W 64° 01' 39"), tras la descarga de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de la ciudad Río Tercero.
4. Puente Andino (PA) (S 32° 25' 12" W 63° 18' 11"), sitio alejado del vertido de efluentes.
5. Aguas abajo de la EDAR de Villa María (BOSN) (S 32° 27' 48" W 63° 11' 00"), a 130 km del embalse Piedras Moras.
6. Ballesteros (AB) (S 32° 34' 54" W 63° 00' 20"), aguas arriba del vertido de líquidos residuales de la ciudad de Bell Ville.
7. Aguas abajo de la colectora cloacal de Bell Ville (S 32° 36' 55" W 62° 37' 47") (AACCBV), a 236 km del embalse Piedras Moras.
8. Saladillo (MB) (S 32° 54' 50" W 62° 19' 33") aguas abajo de la descarga de líquidos residuales de la ciudad de Monte Buey, sitio localizado a 294 km del embalse Piedras Moras y a pocos metros de la confluencia del río Tercero (Ctalamochita) con el río Saladillo.



**Figura 1.** Estaciones de monitoreo de sedimento y localización de fuentes puntuales que descargan en el río Tercero (Ctalamochita).

Se recolectaron muestras de sedimento en junio, septiembre y noviembre de 2013, y en abril y junio de 2014 en las ocho estaciones. Cabe destacar que el monitoreo efectuado en abril de 2014 fue posterior a un periodo extraordinario de crecidas del río Tercero (Ctalamochita) acontecido entre los meses de febrero y marzo de ese año. Durante las campañas, valores registrados de velocidad media del flujo del río en estudio fueron superiores a 0.5 m/s, por lo que el muestreo se efectuó sólo en las orillas (López-Martínez, Galindo-González, & Romo-Moreno, 2009). Se tomaron muestras de alrededor de 5 centímetros de espesor, por debajo del agua, en zonas con poca turbulencia, a una profundidad aproximada de 10 a 20 cm, utilizando una pala. Las muestras se depositaron en bolsas transparentes de polietileno de alta densidad previamente rotuladas y cerradas mediante precintos; luego, en una bolsa negra, para impedir el paso de la luz, y se refrigeraron en una conservadora. En el laboratorio, las muestras se mantuvieron a 4 °C

hasta su procesamiento (USEPA, 2001), que se llevó a cabo dentro de los 14 días posteriores a la extracción (Lee & Jones, 1999; USEPA, 2001; Baena, Silva, & Ramirez-Callejas, 2004).

## **Consideraciones previas al desarrollo metodológico propuesto**

### **Agua confinada**

La demanda bentónica se evaluó de forma indirecta a través del déficit de oxígeno que se producía en el agua al estar en contacto con el sedimento. Se trabajó con agua de dilución, recomendada por los *Standard Methods* para llevar a cabo el procedimiento de demanda bioquímica de oxígeno. Como un control aproximado de la calidad de ésta, se hizo un blanco cada vez que fue preparada.

### **Frascos respirométricos y de reacción**

Se requirieron dos tipos de frascos, con tapa esmerilada y cierre hermético de volúmenes conocidos (calibrados a 20 °C). Por un lado, aquellos en los que se realizó la siembra de sedimento y se los incubó el tiempo requerido (respirómetros individuales) de aproximadamente 300 cm<sup>3</sup>, y otros de menor volumen (frascos de reacción), a los cuales se les trasladó el líquido sobrenadante de los primeros y en los que se llevó a cabo el agregado de reactivos para la valoración del oxígeno disuelto yodométricamente. La calibración de los respirómetros resultó

relevante, por cuanto el método propuesto para la determinación de la SOD exige que el proceso cinético se desarrolle en distintos frascos.

### **Acondicionamiento de la muestra y determinación de la siembra de sedimento**

Se escurrió el agua y se eliminaron materiales gruesos arrastrados durante la extracción de muestra que no eran representativos (USEPA, 2001). Para llevar a cabo una mayor homogeneización, se hizo de manera manual y externamente una mezcla del sedimento, manteniendo la bolsa cerrada, para evitar el ingreso de aire.

Para cada sedimento se efectuaron distintas pruebas, donde la única variable resultó ser la cantidad de muestra sembrada, y se evaluó la variabilidad del oxígeno disuelto con el transcurso del tiempo. A partir de los resultados obtenidos fue posible estimar el volumen y peso de sedimento conveniente a sembrar para cada sitio de monitoreo. Así, cada experiencia se realizó partiendo de una concentración de oxígeno disuelto que posibilitara su seguimiento a lo largo del tiempo y finalizara el ensayo con cierta concentración residual de oxígeno.

Con el fin de lograr que la superficie de sedimento en contacto con el agua confinada fuera homogénea en todos los respirómetros, se llevó a cabo manualmente un giro de cada frasco una vez que fue sembrado y se inició el llenado con el agua confinada.

### **Relación entre el volumen del agua confinada y la superficie del sedimento sembrado**

Una vez establecida la cantidad óptima de sedimento a sembrar para llevar a cabo un ensayo, el volumen de agua confinada quedó automáticamente fijado por el volumen de cada frasco. De esta manera se definió una relación entre el volumen del agua confinada y la superficie de sedimento, que se correspondió con la más conveniente para la determinación propuesta para cada muestra en particular. Resultó importante mantener esta relación constante en cada uno de los respirómetros utilizados en un mismo ensayo, para que el proceso cinético se desarrollara en igualdad de condiciones en cada uno de ellos.

### **Demanda inmediata de oxígeno disuelto y tiempo de monitoreo del oxígeno disuelto**

El movimiento producido como consecuencia del procedimiento de siembra y llenado del respirómetro con el agua a confinar generó una demanda inmediata de oxígeno, en la cual la variación de la concentración de OD con el tiempo fue muy rápida y no lineal, y no era de interés para cuantificar la constante de desoxigenación por parte del sedimento (Nolan & Johnson, 1979; Caldwell & Doyle, 1995; Rounds & Doyle, 1997; Lee & Jones, 1999). Para evaluarla en las condiciones de trabajo, se sembró una muestra de sedimento y se midió la concentración de oxígeno disuelto a los cinco minutos y a intervalos de 10 minutos dentro de la primera hora del ensayo. A partir de dicho tiempo, las lecturas se hicieron en intervalos mayores, para evaluar la variabilidad lineal del oxígeno disuelto en función del tiempo. La mayoría de los ensayos se llevó a cabo durante 26 a 27 horas, intervalo de tiempo que permitió hacer un seguimiento de la disminución del OD como consecuencia de la demanda ejercida por el sedimento.

### **Precisión intraensayo**

Con el propósito de evaluar la precisión del método para calcular la constante de desoxigenación por demanda bentónica y conocer la distribución de los errores aleatorios, se llevó a cabo un ensayo de repetibilidad o precisión intraensayo (ISO, 1994). Para que los datos tuvieran validez estadística, se realizaron 20 determinaciones. Cada respirómetro se sembró con una diferencia de 15 minutos y las lecturas del oxígeno disuelto residual se hicieron a las 16 horas. El ensayo se hizo con la muestra de sedimento tomada en noviembre de 2013, aguas abajo de la colectora cloacal de Villa María.

## **Instrumental y reactivos requeridos**

Se empleó el siguiente instrumental: balanza analítica y granataria; frascos calibrados de vidrio con tapa esmerilada y cierre hermético de aproximadamente 300 cm<sup>3</sup> (respirómetros individuales) y de alrededor de 220 cm<sup>3</sup> (frascos de reacción); embudo; probeta; espátula; piseta; reloj; termómetro; incubadora, y equipamiento requerido para la caracterización de sedimento. Los reactivos fueron los necesarios para la valoración del OD mediante el método de Winkler modificado por Alsterberg y los necesarios para el agua de dilución (Rice, Baird, Eaton, & Clesceri, 2012).

## **Procedimiento para cuantificar la demanda bentónica utilizando respirómetros individuales**

Lo primero que se hizo fue preparar el agua de dilución y acondicionar la muestra. Luego se realizaron ensayos previos para establecer la

cantidad óptima de muestra a sembrar. A partir de los resultados obtenidos se inició el desarrollo metodológico:

1. Se llenó con sedimento una cubeta de volumen conocido, utilizando una espátula.
2. Se enrasó la cubeta y rápidamente se registró su peso, empleando una balanza granataria, con el objetivo de fijar, además del volumen, el peso de muestra a sembrar en cada frasco.
3. Se pasó el sedimento de la cubeta al frasco respirométrico utilizando un embudo y una espátula, los cuales se lavaron usando primero una piseta y luego una probeta con 50 ml de agua de dilución. Luego se introdujo un volumen aproximado de 100 ml del agua de dilución, dejándola deslizar por las paredes del frasco y se realizó de forma manual un giro del mismo, con el propósito de emparejar la superficie del sedimento en el respirómetro.
4. Se completó de forma lenta el volumen del frasco con el agua de dilución.
5. Al finalizar el llenado, se cerró con rapidez, evitando que quedaran burbujas de aire, y se registró el tiempo.
6. Cada frasco respirométrico una vez sembrado, se dejó en reposo, en una incubadora calibrada a 20 °C.
7. Transcurrido el intervalo de tiempo preestablecido para un determinado respirómetro, se trasvasó de manera muy cuidadosa el agua sobrenadante de éste al frasco de reacción, minimizando la resuspensión del sedimento. De inmediato se agregaron los reactivos necesarios para la valoración del oxígeno disuelto a través el método de Winkler modificado por Alsterberg.

El procedimiento descrito se repitió con cada uno de los respirómetros que participaban en un ensayo (Figura 2).



**Figura 2.** A: siembra del sedimento; B: llenado del respirómetro con agua de dilución; C: respirómetros sembrados; D: trasvase del agua confinada al frasco de reacción; E y F: titulación del OD.

Para llevar a cabo el cálculo de constante de desoxigenación por demanda bentónica se aplicó la ecuación utilizada por Nolan y Johnson (1979), propuesta por la USEPA:

$$SOD = \frac{\{(OD_i - OD_f) - (B_i - B_f)\} V}{(T_f - T_i) S} \quad (1)$$

Donde  $SOD$  es la demanda bentónica ( $gO_2/m^2d$ );  $OD_i$ , el oxígeno disuelto en el primer frasco respirométrico ( $g/m^3$ );  $OD_f$ , el oxígeno disuelto en el último frasco respirométrico ( $g/m^3$ );  $B_i$  y  $B_f$ , el oxígeno disuelto inicial y final, respectivamente, del agua confinada cuando se trabaja con agua del río ( $g/m^3$ );  $V$ , el volumen de agua confinada ( $m^3$ );  $S$ , el área de sedimento ( $m^2$ );  $T_f$ , el tiempo de lectura del último frasco respirométrico (días), y  $T_i$  es el tiempo de lectura del primer frasco respirométrico (días). En este trabajo, se utilizó agua de dilución como agua confinada y tras realizar un blanco cada vez que fue preparada, se corroboró que la misma no demandaba oxígeno disuelto en el tiempo transcurrido de cada ensayo. Por lo tanto, se despreció el término  $(B_i - B_f)$ .



Todos los respirómetros una vez sembrados se llevaron a una incubadora a 20 °C, por lo que no fue necesario realizar correcciones por temperatura a los valores calculados de demanda bentónica.

El volumen del agua confinada en los respirómetros se obtuvo por diferencia entre el volumen de cada uno de ellos y el volumen de sedimento sembrado. En este trabajo se adoptó como criterio calcular la media de los volúmenes de agua confinada de todos los frascos empleados en cada ensayo, estandarizar los datos obtenidos de oxígeno disuelto refiriéndolos a ese volumen y utilizar dicho valor en la ecuación (1). Fue la única manera de garantizar que el proceso cinético desarrollado en cada frasco haya sido el mismo, posibilitando informar una correcta y comparable concentración de OD en cada respirómetro.

## Caracterización de sedimentos

Al finalizar las cuantificaciones de *SOD*, las muestras de sedimento se caracterizaron en función de su aspecto; color; olor; densidad; pH; humedad; sólidos totales, fijos y volátiles, y a partir de éstos se obtuvo un valor aproximado del contenido de materia orgánica.

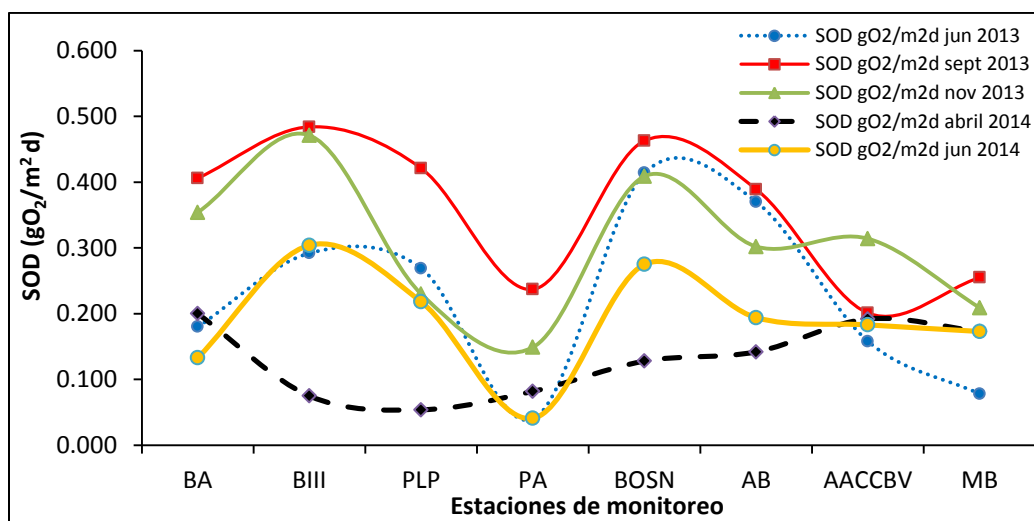
## Resultados

La demanda inmediata de oxígeno tuvo lugar dentro de los primeros 45 minutos aproximadamente, motivo por el cual se registraron datos a partir de los 60 minutos para cuantificar la demanda bentónica.

A partir del ensayo de repetibilidad se observó que la media y la mediana coincidieron, por lo que el valor que apareció con mayor

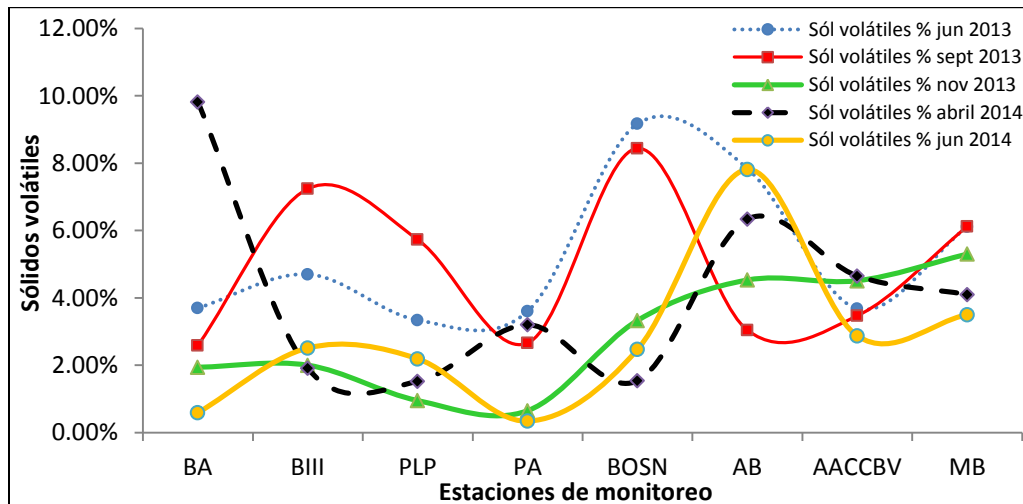
frecuencia fue el que ocupó el centro de la distribución. La precisión de los resultados de la medición, expresados como una desviación estándar obtenida bajo condiciones de repetibilidad, fue de 0.05 mg/l.

Los resultados obtenidos de la constante de desoxigenación bentónica en las ocho estaciones del río Tercero (Ctalamochita), cuantificadas entre junio de 2013 y junio de 2014, se muestran en la Figura 3. Exceptuando la campaña de abril de 2014, donde se tomaron muestras bajo condiciones alteradas, los mayores valores se encontraron en BIII y en BOSN, aguas abajo de un polo industrial y de una colectora cloacal, respectivamente. Los valores menores se cuantificaron en PA, sitio en donde las actividades antrópicas tienen poca influencia sobre el río.



**Figura 3.** Variabilidad espacial y temporal de la demanda bentónica.

En cuanto a la caracterización de las muestras, se pudo evidenciar en la mayoría de los casos que altos valores de demanda bentónica se correspondieron con los sedimentos con mayor porcentaje de sólidos volátiles y viceversa, siguiendo además, un mismo patrón a lo largo de los sitios de muestreo, exceptuando los resultados de la campaña de abril de 2014 (Figura 4).



**Figura 4.** Variabilidad espacial y temporal de los sólidos volátiles.

De modo complementario y como era de esperarse, se evidenció en la mayoría de los casos un comportamiento opuesto entre la demanda de oxígeno ejercida por el sedimento y el oxígeno disuelto del agua cuantificado en cada estación de monitoreo, y una conducta similar entre la demanda bentónica y la demanda bioquímica de oxígeno del agua. Dichos resultados ratificarían lo reportado por diferentes autores en relación con el importante papel que juega el sedimento en el balance de oxígeno de una corriente (USEPA, 1985; Caldwell & Doyle, 1995; Baena *et al.*, 2004; Mateus-García, 2011).

## Discusión

Los mayores valores de demanda bentónica se cuantificaron aguas abajo del vertido de una planta de líquidos cloacales y aguas abajo de la descarga de efluentes provenientes de un polo industrial. En contraposición, el menor valor se obtuvo en un sitio alejado del vertido

de aguas residuales. Los resultados hallados ponen de manifiesto la influencia de las actividades antrópicas en el consumo de oxígeno por parte del sedimento en el río estudiado.

La falta de antecedentes sobre la demanda bentónica en el río Tercero (Ctalamochita) imposibilita comparar los resultados obtenidos. Sin embargo, el intervalo de valores de *SOD* obtenidos a 20 °C estuvo comprendido entre 0.040 y 0.484 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d, siendo similares a los reportados por la EPA para sedimentos minerales y arenosos de ríos (USEPA, 1985). Las diferencias halladas en los distintos sitios y épocas se atribuyeron a diversos factores, entre ellos las características de cada sedimento; las distintas condiciones estacionales e hidrológicas en las que se efectuaron los muestreos como el caudal; la velocidad del agua; la temperatura, y la heterogeneidad de cada sedimento, además de la influencia de la descarga de líquidos residuales.

La metodología propuesta, con sus debidos controles y consideraciones, contribuye a la evaluación de la calidad de las aguas naturales, haciendo un aporte a la modelación del oxígeno disuelto.

## Conclusiones

- La metodología aplicada permitió cuantificar la demanda de oxígeno ejercida por el sedimento empleando respirómetros individuales sin la necesidad de agitar el agua confinada.
- Exceptuando la campaña de abril de 2014, la menor demanda bentónica se obtuvo en un sitio alejado del vertido de efluentes, y los mayores valores se cuantificaron aguas abajo de un polo industrial y de una colectora cloacal. Los hallazgos obtenidos evidencian la influencia de las actividades antrópicas sobre la demanda de oxígeno que ejerce el sedimento.
- La determinación experimental de la constante de desoxigenación bentónica del río Tercero (Ctalamochita) realizada en este estudio, se

convirtió en una primera aproximación para ser considerada en el balance del oxígeno disuelto del río.

- La metodología propuesta, con sus debidos controles, resulta ser accesible por la mayoría de los laboratorios, al requerir instrumental básico para cuantificar la demanda bentónica, de manera que puede ser fácilmente aplicada a distintos cuerpos de agua, con el propósito de calibrar modelos con datos reales, contribuyendo a la evaluación de la calidad del recurso.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), a Hidromediterránea, y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

### Referencias

- Baena, L. M., Silva, J. P., & Ramirez-Callejas, C. (2004). Estudio experimental para la determinación de las constantes bénticas en el río Cauca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 1(1), 12-17.
- Caldwell, J. M., & Doyle, M. C. (1995). *Sediment oxygen demand in the lower Willamette River, Oregon, 1994* (Report 95-4196). U.S. Geological Survey Water Resources Investigations, Oregon, United States.
- Cossavella, A., Carranza, P., Oroná, C., Monarde, F., Larrosa, N., Nadal, F., Roqué, M., Nuño, C., Hunziker, M., Ferreyra, M., Brito, R., Saldaño, V., Melián, J., Bresciano, J., & Diaz, A. (octubre, 2013). Gestión de efluentes líquidos en la cuenca del río Tercero (Ctalamochita). En Simposio llevado a cabo en el XXIVº Congreso Nacional del Agua, San Juan, Argentina.
- ISO, International Organization for Standardization. (1994). *ISO 5725-1:1994. International standard. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1: General principles*

- and definitions*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization
- Lee, G. F., & Jones, R. A. (1999). *Oxygen demand of US waterway sediments*. Report. El Macero, USA: G. Fred Lee & Associates.
- Lee, G. F., & Jones-Lee, A. (2000). *Issues in developing the San Joaquin River. Deep water ship channel DO TMDL. Report to San Joaquin River Dissolved Oxygen Total Maximum Daily Load Steering Committee and the Central Valley Regional Water Quality Control Board Sacramento, USA*. Report. El Macero, USA: G. Fred Lee & Associates.
- López-Martínez, M. L., Galindo-González, D. F.- & Romo-Moreno, G. D. (2009). Determinación de la constante de desoxigenación por demanda béntica en el río Pasto. *Criterios*, (23), 59-73.
- Mateus-García, S. I. (2011). *Determinación de la influencia de los factores hidrodinámicos y de calidad del agua en la demanda béntica de la cuenca alta del río Bogotá* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Nolan, P. M., & Johnson, A. F. (1979). *A method for measuring sediment oxygen demand using a bench model benthic respirometer*. United States Environmental Protection Agency. Region I. Boston, USA: Library JFK Federal BLDG,
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (22<sup>nd</sup> ed.). Washington, DC, USA: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF).
- Rounds, S. A., & Doyle, M. C. (1997). *Sediment oxygen demand in the Tualatin River Basin, Oregon 1992-96* (Report 97-4103). Oregon, USA: US Geological Survey Water Resources Investigations.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (1985). *Rates, constants and kinetics formulation in surface water quality modeling* (2<sup>nd</sup> ed.) (PA 600/3-85/040). Athens, USA: Environmental Research Laboratory Office of Research and Development.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2001). *Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: Technical Manual* (EPA 823-B-01-002). Washington, DC, USA: Office of Water, United States Environmental Protection Agency.

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-02-10

Notas

## **Experimentos de equilibrio de lechos fluviales de arena y grava**

### **Flume experiments on the equilibrium of sand-gravel bed rivers**

Juan P. Martín-Vide<sup>1</sup>

Francisco Núñez-González<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, Barcelona, España, [juan.pedro.martin@upc.edu](mailto:juan.pedro.martin@upc.edu)

<sup>2</sup>Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Univ. Braunschweig, Braunschweig, Alemania, [fngon@yahoo.com](mailto:fngon@yahoo.com)

Autor para correspondencia: Juan P. Martín-Vide, [juan.pedro.martin@upc.edu](mailto:juan.pedro.martin@upc.edu)

#### **Resumen**

Se describe una instalación de laboratorio que permite realizar ensayos en canal con alimentación separada de arena y grava, como es característico de los lechos de muchos ríos. Se hacen ensayos de gran duración, en que el transporte como carga de fondo llega a valer 1 kg/s. El material sólido que sale del canal se envía hacia la cabecera, en donde se separa la grava de la arena. La alimentación se hace con dos tolvas, una para cada material, cuyos pesos se miden continuamente para conocer los caudales de alimentación. Los ensayos persiguen alcanzar el equilibrio, es decir, la permanencia del lecho sin erosión ni crecimiento a largo plazo. Se ofrecen ejemplos reales de varios tipos de ensayo: recirculación con erosión del lecho y con crecimiento del lecho,



recirculación pura y alimentación pura. Los cuatro son ejemplos de transporte sólido con movilidad igualada. Se presenta una discusión del significado de los ensayos.

**Palabras clave:** canal hidráulico, lecho de arena y grava, transporte de sedimento, recirculación vs. alimentación, equilibrio fluvial, hidráulica fluvial, incisión, erosión, acumulación.

### **Abstract**

A laboratory facility which is able to perform hydraulic tests with the separate feeding of sand and gravel into a flume is described. Mixtures of sand and gravel are typically found in many river beds. The facility allows for long duration tests with bed load rates as high as 1 kg/s. The material collected in the flume outlet is sent to the inlet area where gravel fractions are separated from sand. The feeding of a test is made by two hoppers, one for each material. Each hopper weight is continuously monitored to know the feeding rate (bed load rate). All the tests search for equilibrium, that is to say for a steady bed profile with neither incision nor accumulation in the long term. Different types of tests are shown as examples: recirculation with bed incision and accumulation, pure recirculation and pure feeding. The four are examples of equal mobility in terms of sediment transport. A discussion follows about the meaning of flume tests.

**Keywords:** Flume, sand-gravel mixtures, sediment transport, recirculation vs. Feeding, river equilibrium, fluvial hydraulics, incision, degradation, aggradation.

Recibido: 25/02/2016

Aceptado: 18/07/2018

## **Introducción**

El flujo de agua en un río aluvial puede mover las partículas que forman su lecho y transportarlas de varias maneras, por ejemplo, saltando por el fondo. Este transporte de sólidos origina cambios del propio lecho. Mirando de cerca, los dos fenómenos más importantes son: 1) las formas de fondo, es decir las ondulaciones del lecho, y 2) el acorazamiento, es decir que las partículas más gruesas situadas en la superficie protejan a las más finas. Mirando de lejos, el transporte sólido puede afectar al perfil longitudinal del río. Las alternativas al respecto son la erosión del fondo (descenso de su nivel o *incisión*) y, su opuesto, la *acreción* o crecimiento del nivel de fondo. Ambos pueden venir acompañados de un cambio de pendiente.

La noción de equilibrio fluvial se refiere a que, a largo plazo y haciendo abstracción de los fenómenos descritos "mirando de cerca", el perfil longitudinal del río ni asciende ni desciende (ni cambia de pendiente) a pesar del transporte sólido de material de fondo; en otras palabras, el lecho móvil o "vivo" permanece estable "mirándolo de lejos". El tipo de transporte que se menciona no incluye la suspensión de partículas finas con origen en la cuenca, sino sólo al material con origen en el fondo.

El estudio del equilibrio ha sido una pieza clave de la investigación en hidráulica fluvial desde sus inicios. Por ejemplo, el transporte sólido de fondo se determina exigiendo el equilibrio. De lo contrario, el caudal de partículas transportadas estaría desvirtuado por la contribución de las que son arrancadas del fondo si el perfil está al mismo tiempo descendiendo o, inversamente, desvirtuado por la sustracción de las que están depositándose en el fondo si al mismo tiempo está ascendiendo. Las fórmulas de transporte sólido, que dan un valor del caudal sólido de fondo como función del flujo de agua, suponen la existencia de equilibrio. En ello está implícito, por cierto, que exista una aportación de sólidos desde aguas arriba suficiente como para colmar la capacidad de transporte (dada por las fórmulas), de manera que la fórmula exprese el transporte verdadero. Para el equilibrio es también necesario un régimen uniforme, pues en régimen variado hay una variación de la capacidad de transporte según la posición, lo cual es incompatible con la estabilidad del perfil con el paso del tiempo.

Este artículo trata de cómo se exige el equilibrio y cómo se alcanza en ensayos de laboratorio en lecho móvil. Esto se limita a un típico canal recto de laboratorio. El contexto es el de los ríos de gravas, cuyo estudio se ha apoyado en experimentos (Parker, 2008). El núcleo del artículo es la discusión de cómo trabaja una instalación proyectada para estudiar lechos aluviales de arena y grava en ríos de gran pendiente y, por tanto, con mucho transporte sólido, alargando la duración de ensayo para alcanzar el equilibrio. Por este motivo, la instalación debe manejar volúmenes muy grandes de sólidos. El objetivo del artículo es mostrar distintos tipos de ensayo de lecho móvil en equilibrio a través de la experiencia con dicha instalación y, en segundo lugar, discutir su significado para estudiar los perfiles de equilibrio de ríos reales.

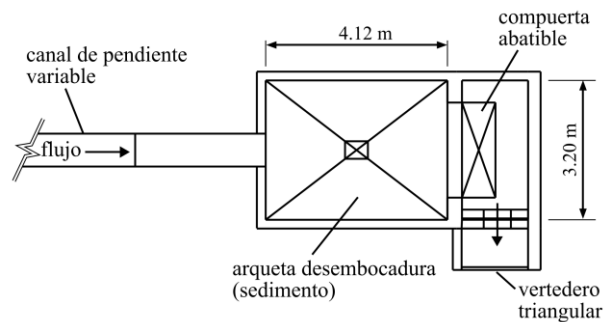
## Descripción de la instalación

La dificultad al planear ensayos de equilibrio en un canal de laboratorio es el gran volumen de material granular necesario. El equilibrio se alcanza poco a poco, con ritmo más lento cuanto más cerca se encuentre el estado presente del equilibrio. Esta propiedad se resume en la noción matemática de asíntota: el equilibrio es la asíntota cuando el tiempo tiende a infinito. En la práctica, el equilibrio se da por alcanzado si se consigue una cierta aproximación a la asíntota. Durante el tiempo transcurrido hasta el equilibrio práctico ha circulado agua y material sólido. El agua regresa a la cabecera del canal y se suele ignorar, por ello, el enorme volumen que ha circulado. Tal enormidad salta a la vista en el caso del caudal sólido, aunque sea mucho menor que el del agua: por ejemplo, 1 kg/s de arena (alcanzado en esta instalación) en un ensayo de 10 horas de duración implica 36 toneladas de arena (unos 20 m<sup>3</sup>). Por ello, se ha de aplicar la idea de una recirculación o circuito cerrado también para el material granular. Esto es aún más necesario para estudiar ríos de gran pendiente y transporte.

Así, se han hecho en destacados experimentos en ríos de grava (Wilcock & McArdeil, 1993; Marion & Fraccarollo, 1997).

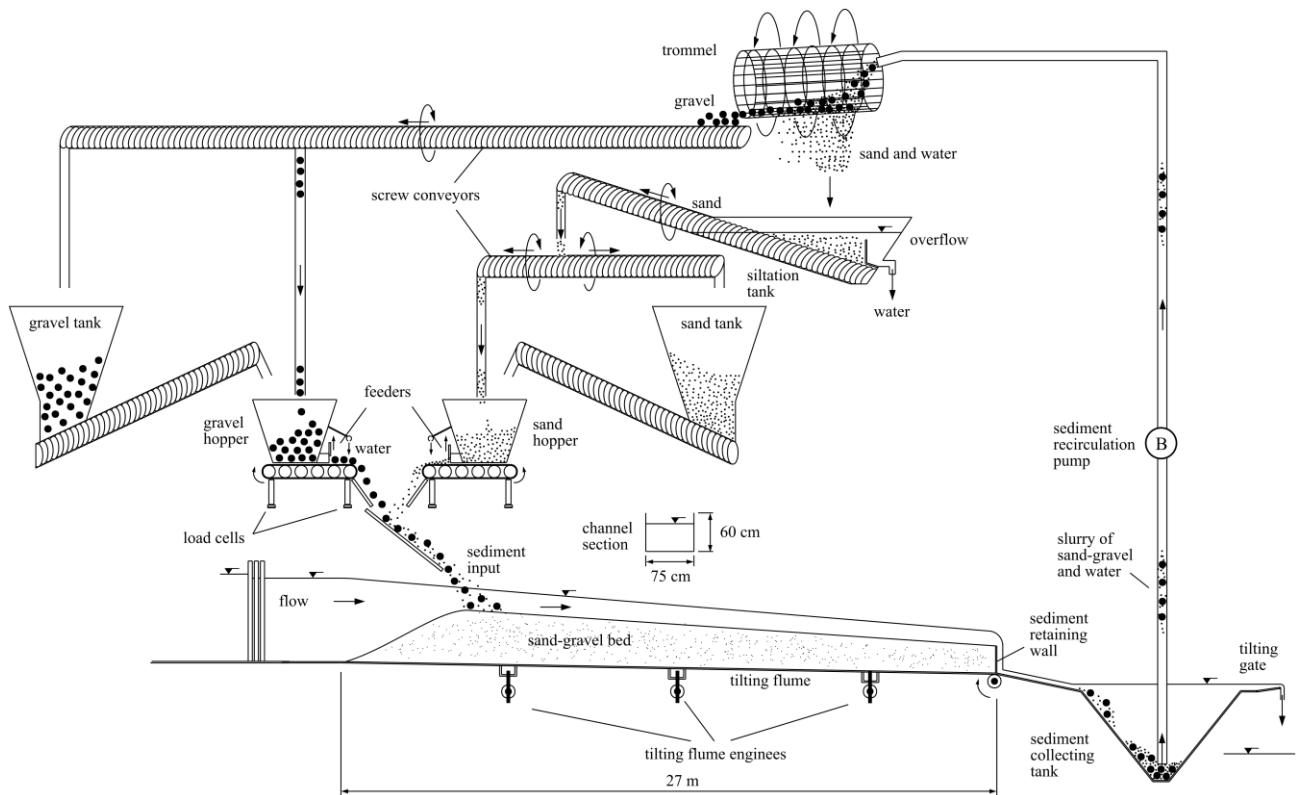
La instalación básica es un canal de 30 m de longitud, de inclinación variable, con sección rectangular de 0.75 m de anchura y 0.60 m de altura, paredes de vidrio y fondo de PVC. Tal canal está alimentado por un circuito de agua compuesto por: 1) un depósito acumulador subterráneo de 1.5 m de profundidad y 200 m<sup>2</sup> de superficie; 2) tres bombas de 90 l/s cada una; 3) un depósito regulador elevado (20 m<sup>3</sup>) de carga, y 4) una conexión por medio de tres tuberías flexibles, con sendas válvulas y caudalímetros desde el depósito regulador al canal. La disipación de energía se realiza en la cabecera, en un área un poco más profunda.

El canal de pendiente variable se apoya y sujeta en un depósito de desembocadura (arqueta) al que está articulado (bisagra), mientras que en el extremo de aguas arriba está libre, razón de que las tuberías de entrada sean flexibles. La arqueta de la desembocadura es un recinto grande, con la misión de separar el agua del material granular (Figura 1). Esta función es esencial para que sea viable un circuito de sólidos sin pérdida apreciable de material. Anteriormente se había proyectado un canal que estaba articulado aguas arriba mientras era libre aguas abajo, en donde se prolongaba con una pequeña arqueta solidaria (Martín-Vide & Andreatta, 2006). En esta pequeña arqueta el flujo era tan agitado que escapaban granos de arena con el agua a partir de cierto caudal. En el caso de este artículo, la arqueta es tan grande que no hay pérdida de granos incluso para el caudal máximo de 100 l/s. La arqueta es un tronco de pirámide invertido para que en su fondo se recoja el material granular. La salida superficial de agua de la arqueta está controlada con una compuerta a la que sigue un vertedero triangular de pared delgada, que sirve de comprobación del caudalímetro en cabecera.



**Figura 1.** Arqueta de separación de agua y sedimento vista en planta. Para el corte, ver la Figura 2.

El circuito del material granular, más complejo que el del agua, comienza en esta arqueta de desembocadura. Sustituye a una recirculación manual frecuente en muchos experimentos (Wilcock & McArdell, 1993), pero no es único en la bibliografía (Marion & Fraccarollo, 1997), aunque sí destaca por sus dimensiones. Una bomba aspira el sedimento con agua desde el fondo de la arqueta y lo impulsa por una tubería de 10 cm de diámetro hacia unos aparatos en la zona de cabecera, cuyo objetivo (Figura 2) es separar las dos fracciones granulares (arena y grava), escurrirlas y llevarlas a dos destinos posibles: la cabecera del canal o el almacenamiento temporal en silos. La separación básica entre arena y grava se realiza, a la cota más alta, con un aparato originario de la minería, llamado *trommel*, que consiste en un tambor giratorio, de eje ligeramente inclinado respecto a la horizontal, con la pared revestida de malla, cuyo paso es de 2.25 mm. La tubería de impulsión descarga directamente el chorro de agua con arena y grava en el interior de este tambor. La arena (diámetro < 2.25 mm) y el agua escapan por la malla, pero la grava ( $\geq 2.25$  mm) prácticamente escurrida llega al extremo inferior del tambor sin cruzarla. Esta malla es una "piel", fácil de cambiar por otra de distinto paso si se quiere modificar la cifra de 2.25 mm que separa la fracción fina de la gruesa. A la arena escapada del tambor le falta ser separada del agua: un desarenador con tornillo sinfín extrae la arena prácticamente escurrida.



**Figura 2.** Circuito completo del material granular en la instalación.

La experiencia con esta primera parte del circuito ha sido satisfactoria. El desarenador es el elemento que mejor funciona: tiene gran capacidad de extracción; no se pierde arena por el desagüe; en funcionamiento continuo mantiene constante la carga sólida en su interior y puede trabajar bien con distintos grados de carga; el tambor *trommel* funciona bien: tan sólo necesita alguna vez un chorro de agua de limpieza para despedir las partículas atoradas en la malla; la bomba (y en menor medida la tubería) sufre una abrasión considerable por los sólidos, que se ha remediado con un cambio frecuente de rodete; por último, la mayor dificultad es la aspiración del fondo de la arqueta: en ocasiones la boca de aspiración queda enterrada o atorada, y en otras no es

completamente eficaz en aspirar el material; lo mejor es que la boca tenga libre la orientación de la aspiración.

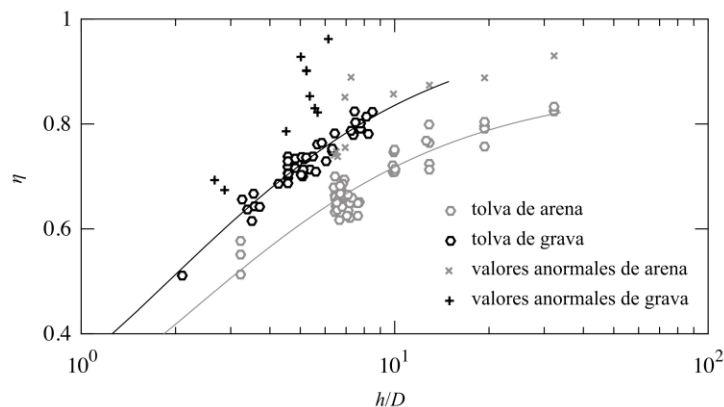
La segunda parte del circuito del material granular, menos importante, consiste en llevar la arena y la grava a sus dos destinos posibles, el principal —el canal— y el auxiliar —los silos—. El desplazamiento se realiza con tornillos sinfín para ambos materiales. En el caso de la arena, por ejemplo, cambiando el sentido de giro del tornillo, la arena se dirige al silo (almacenamiento) o al canal (recirculación). El caso de la grava es similar. Los dos silos iguales, uno para cada material, tienen un volumen de 6 m<sup>3</sup>. Los dos están equipados con escotillas de fondo y tornillos sinfín para extraer y transportar el material hacia el canal.

La tercera parte del circuito, de hecho la más importante, tiene el objetivo de suministrar la arena y la grava al canal de forma controlada. Para ello, se cuenta con dos tolvas dosificadoras de acero, una para cada material, con la típica forma de tronco de pirámide invertido y una capacidad de 900 litros cada una. Cada tolva recibe su material por el camino de la recirculación (*trommel*-desarenador-tornillo sinfín para la arena y *trommel*-tornillo sinfín para la grava) o desde los silos con tornillos sinfín, en caso de reposición de material. Estas tolvas son necesarias para alimentar un ensayo con un caudal sólido a voluntad. La dosificación de las tolvas se sirve de la apertura de una compuerta plana deslizante y de la velocidad de una cinta extractora.

## Medidas y modos de funcionamiento

Cada tolva dosificadora descansa en cuatro puntos, en donde cuatro células de carga dan continuamente el peso total del aparato incluido su contenido. Con esta medida de peso es posible calibrar las tolvas, es decir conocer el caudal sólido en peso que suministran al canal. Usando la analogía con la hidráulica, el caudal sólido suministrado por la tolva se

expresaría como área  $\times$  velocidad, o sea el producto de la apertura de la compuerta (área  $A$ , igual a altura por anchura) por la velocidad de la cinta ( $v$ ). Se han realizado ensayos de calibración de la tolva consistentes en el vaciado de su contenido con una tabla de distintas velocidades de la cinta y aperturas de la compuerta. Así, se ha probado que la cantidad suministrada por las tolvas es constante a lo largo del vaciado, con independencia de su grado de llenado. Esta es una propiedad conocida en la ingeniería de dosificación de granulados. En segundo lugar, el caudal sólido ( $Q_s$ ) es, en efecto, una función monótona creciente de los dos parámetros: apertura y velocidad, pero está lejos de ser igual a su producto. Durante la calibración se tomaban muestras del material dosificado por cada tolva para determinar su humedad ( $\omega$ ). También se sabe la densidad ( $\rho$ ) y el índice de huecos ( $\varepsilon$ ) de cada material. El cociente de estas magnitudes en la forma adimensional  $Q_s / [A \cdot v \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (1 + \omega)]$ , notado como  $\eta$ , expresa hasta qué punto la analogía es válida. Si este coeficiente fuera la unidad, el material granular sería extraído por la cinta exactamente como una materia arrastrada, pero el coeficiente siempre es menor que 1, más cerca de la unidad para la grava que para la arena. El resultado se da en la Figura 3 (Núñez-González, 2012): para cualquier apertura de compuerta y velocidad de la cinta se obtiene el valor de  $Q_s$  suministrado por la instalación. Con este caudal sólido calibrado y el caudal de agua (caudalímetros) queda definido un ensayo de lecho móvil.



**Figura 3.** Calibración de las tolvas de arena y grava, en términos del coeficiente adimensional  $\eta$  descrito en el texto;  $h$  es la apertura (altura) de compuerta,  $A = h \cdot B$ , *Tecnología y ciencias del agua*, 10(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2019-02-10 268



con  $B$  su anchura (constante);  $D$  es el tamaño de grano. Los “valores anormales” ocurren con velocidades demasiado bajas de la cinta extractora.

Las tolvas reciben el material recirculado al ritmo irregular de su salida del canal, ritmo quizá más irregular aún por los azares en la impulsión y la separación, y demorándose más o menos en el camino. Pero sólo puede haber cierto almacenamiento temporal en la arqueta de desembocadura (o sea, que esté más llena o más vacía), no en la bomba, ni en la tubería, *trommel* y desarenador (el cual mantiene carga constante). Estas irregularidades y desfases temporales son precisamente amortiguados y corregidos por las tolvas, pues entregan al canal un caudal de arena y de grava constantes cualquiera que sea su grado de llenado.

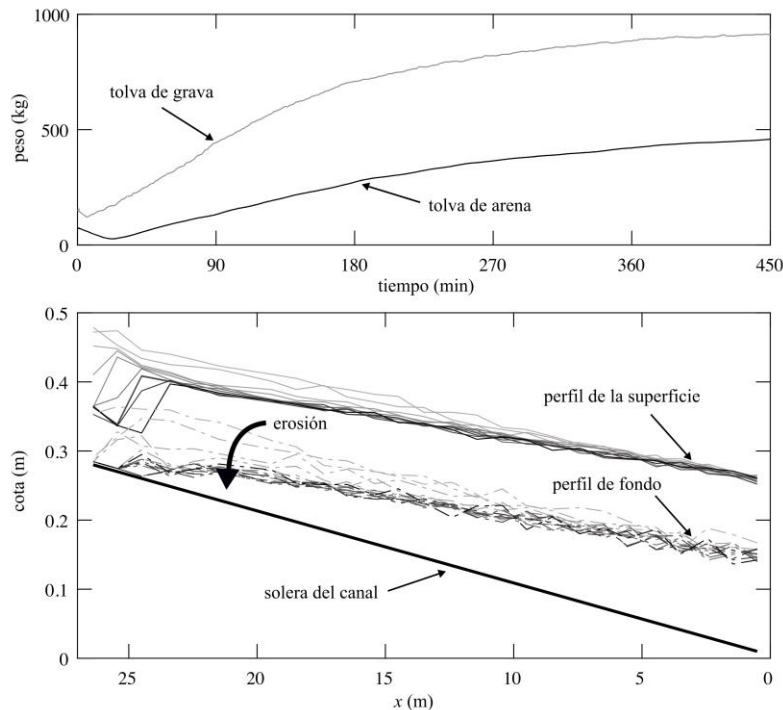
La variación temporal del peso de la tolva, registrada de modo continuo, es la diferencia entre el caudal sólido que entra a la tolva y el que sale dosificado. Por tanto, si se cuida que el material no se almacene en el camino (en la arqueta), la variación del peso de la tolva indica la diferencia entre la capacidad de transporte del canal y el caudal sólido suministrado al canal. Si el peso de la tolva va aumentando, es necesariamente porque el volumen aluvial en el canal está disminuyendo (erosión del lecho), debido a que la capacidad de transporte es mayor que el suministro; si, en cambio, el peso va disminuyendo, es porque el volumen está aumentando (*acreción* del lecho), debido a que el suministro es mayor que la capacidad; si el peso es constante, es porque hay equilibrio, es decir, el suministro y la capacidad coinciden. Un peso de las tolvas constante es, por tanto, la mejor medida del equilibrio del ensayo.

También se puede hacer otro tipo de ensayo de recirculación, llamado *pura*, si las tolvas están vacías, sus compuertas abiertas y la cinta extractora en marcha, de modo que la arena y la grava devueltas a cabecera crucen cada tolva vacía en un instante, casi como si no existieran. Se puede también hacer un ensayo de alimentación *pura*, en la que el material suministrado no es material recirculado sino aportado desde los silos, manteniendo también vacías las tolvas. En el modo de funcionamiento habitual, llamado “recirculación”, la medida en las tolvas (peso vacío + peso del contenido) sirve para estudiar el equilibrio. Este

modo se caracteriza porque las tolvas entregan el material como en alimentación, como si fueran silos más pequeños, pero el material ha circulado ya por el canal, más exactamente acaba de circular por él. En rigor, se trata de un híbrido entre recirculación y alimentación. El material en efecto es recirculado, pero se suministra de nuevo al canal con una tasa controlada de forma independiente por las tolvas, como en un ensayo de alimentación.

## Ejemplos de funcionamiento

Para ilustrar los tipos de ensayo y discutir su significado se presentan a continuación cuatro ejemplos (Núñez-González, 2012). La Figura 4 muestra el peso en las dos tolvas a lo largo del tiempo en un ensayo de recirculación (modo habitual). El lecho inicial está formado por una mezcla de arena y grava fina, confinada en el extremo de aguas abajo por una barrera transversal a ras de lecho (siempre presente, de lo contrario el lecho se desmoronaría). Ambas tolvas comienzan el ensayo relativamente vacías, suministrando desde el inicio un caudal sólido constante de 0.137 kg/s, compuesto por los mismos porcentajes de arena y grava (32 y 68%) que se encuentran en el lecho. En un primer momento las tolvas se vacían todavía más, pero pronto empiezan a recibir el material recirculado, llenándose poco a poco. Los tramos cuasi-horizontales de ambas líneas a partir de las 7 h indican la aproximación al equilibrio. El aumento de peso en las tolvas es prueba de que al equilibrio se ha llegado en un proceso de incisión del lecho debido a que el caudal sólido era escaso para la capacidad de transporte, dado el caudal (78.4 l/s), la pendiente inicial del fondo (0.86%) y la granulometría.



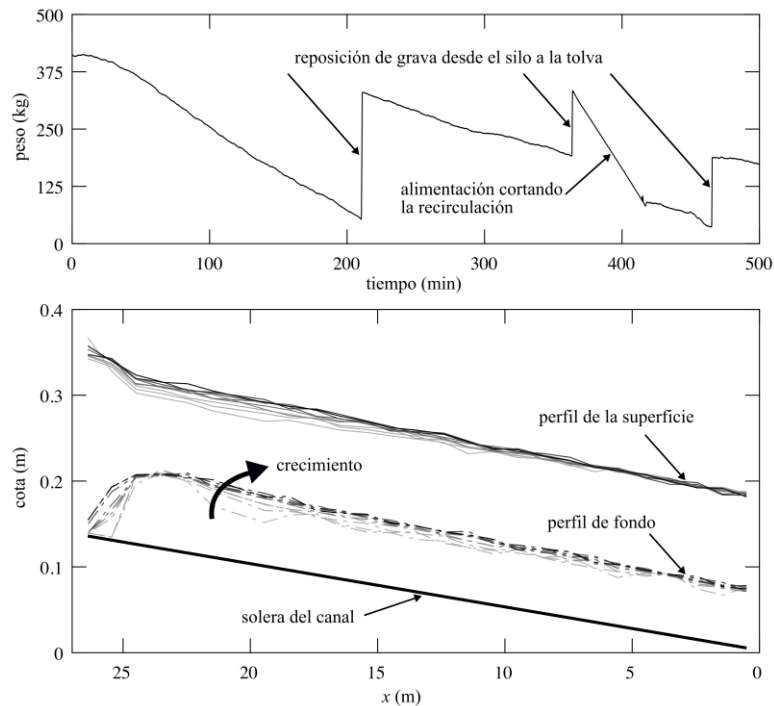
**Figura 4.** Ensayo de una mezcla de arena (1.4 mm, 32%) y grava (4.1 mm, 68%), bajo un caudal sólido de 0.137 kg/s, líquido de 78.4 l/s. Arriba: peso en ambas tolvas. Abajo: perfiles del fondo y del agua cada hora (flujo de izquierda a derecha).

Otro punto de interés de la Figura 4 es el diferente tiempo de recuperación de peso de una y otra tolva. Al empezar el ensayo, la arena recirculada se demora en llegar unos 20 minutos, unas tres veces más de lo que tarda en llegar la grava. La razón es el recorrido más largo de la arena, por la presencia del desarenador en su circuito (Figura 2). No obstante, a largo plazo, las ganancias de peso en una y otra tolva deben guardar la misma proporción que la composición del lecho que se va erosionando si la granulometría del material en movimiento es la misma que la del material del fondo, como es el caso de este ejemplo.

El modo en que en efecto ha ido ocurriendo la incisión se puede ver en la Figura 4. Al perfil de fondo inicial de más pendiente le sucede un perfil final de menos pendiente, que ha girado respecto al extremo de aguas abajo, donde se encuentra la barrera del lecho ( $x = 0$ ). Para estudiar este cambio de pendiente se han ajustado rectas a los datos

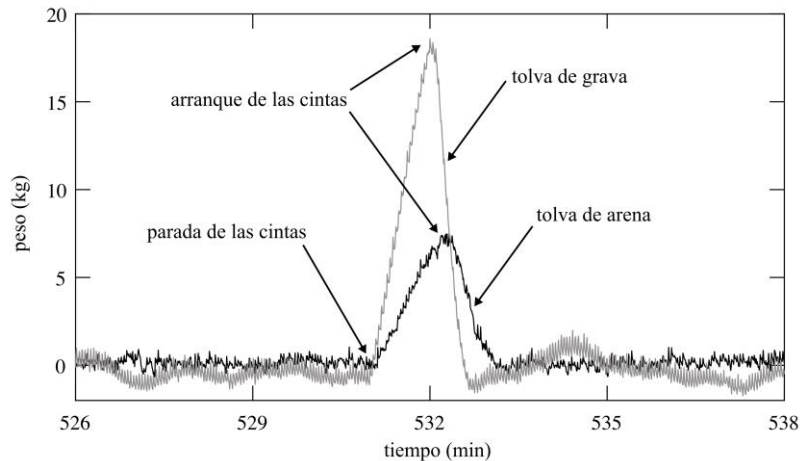
experimentales, al inicio y al final del ensayo, excluyendo los primeros 10 m de canal afectados por la aceleración del agua y la curvatura del fondo. La pendiente del agua va disminuyendo al unísono de la baja de la pendiente del fondo. El régimen es más o menos uniforme en los tramos ajustados, de más de 15 m de longitud, aunque en rigor sólo es uniforme en el estado de equilibrio final.

El segundo ejemplo es también de recirculación en el modo habitual, en este caso con lecho de grava y con un caudal sólido de suministro (0.081 kg/s de la misma grava) superior a la capacidad del transporte sólido en el canal. En consecuencia, la tolva de grava, que comienza con menos de 400 kg, se va vaciando (Figura 5). El riesgo de quedar vacía llevó a una reposición con grava del silo tres veces (produciendo los saltos verticales de peso en la Figura 5). En otro momento se empleó el artificio de desviar hacia los silos el material recirculado para conocer el caudal suministrado en realidad por la tolva sin recurrir a la calibración de la Figura 3. Esto se manifiesta en la línea de máxima pendiente en descenso (Figura 5). El cambio de perfil de fondo y superficie libre muestra el comportamiento opuesto a la incisión del primer ejemplo: una acreción, debida a un suministro mayor que la capacidad de transporte. La pendiente aumenta de forma ligera, ya que el perfil del fondo gira como antes respecto a  $x = 0$ .



**Figura 5.** Ensayo de un lecho de grava (4.1 mm, 100%), con caudales de 78.7 l/s y sólido de 0.081 kg/s en el canal. Arriba: peso en la tolva. Abajo: perfiles del fondo y del agua, cada hora. La pendiente de la solera del canal es 0.5%.

El tercer ejemplo es de recirculación pura. Un lecho semejante al del primer ejemplo (32% de arena, 68% de grava) con pendiente inicial del fondo 1.28% se somete al flujo de 78.4 l/s y a la recirculación pura, como si no existieran las tolvas. Si la capacidad de transporte es muy elevada, como es el caso con una pendiente tan alta, el caudal sólido recirculado será al poco tiempo también muy elevado, tanto como para igualar a la capacidad, y lo mismo pasaría con valores menores de capacidad de transporte. Así, en este tipo de ensayos, los cambios de pendiente y régimen hidráulico con respecto al estado inicial pueden ser de poca importancia (por ello no se presentan perfiles de fondo y agua en la Figura 6). Ésta es una propiedad de la recirculación pura en la instalación que se presenta.

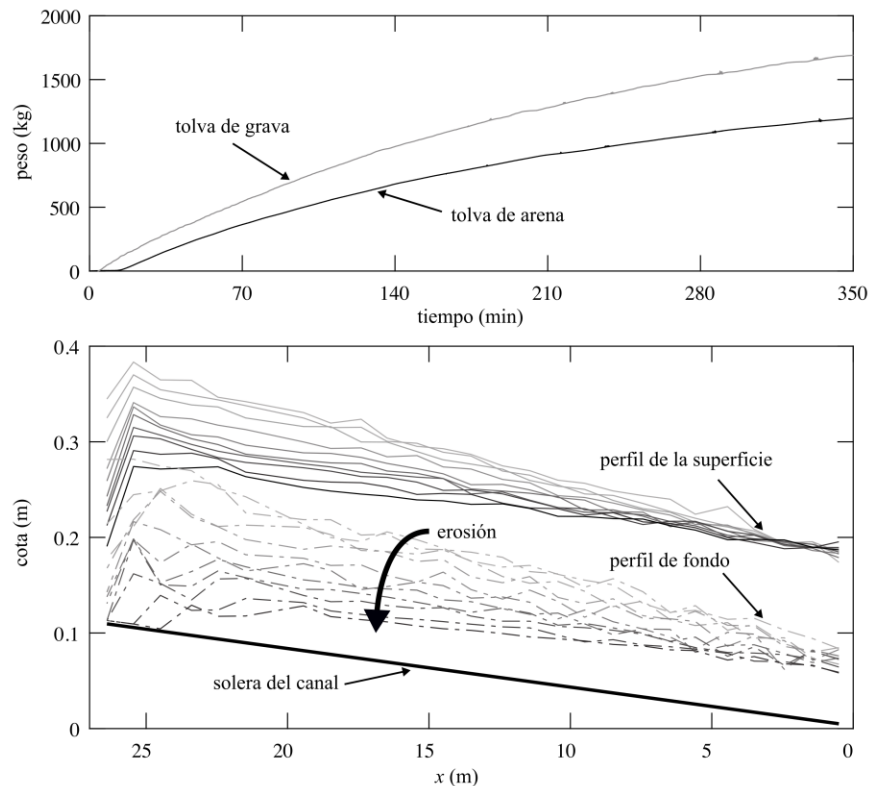


**Figura 6.** Peso en las tolvas (vacías) de arena y grava, incluyendo 1 minuto de interrupción de la dosificación, en un ensayo de recirculación pura.

Dado que el peso de las tolvas es siempre nulo, parece que se perdería la posibilidad de medida del caudal sólido. No obstante, la medida se puede hacer parando de modo momentáneo las cintas extractoras y determinando la pendiente con que crece el peso en las tolvas por acumulación del material recirculado. Este artificio se puede aplicar en cualquier otro ensayo para conocer en un momento dado el caudal sólido recirculado. Al volver a arrancar las cintas tras la interrupción, el volumen acumulado se entrega en seguida al canal. La operación se ilustra en la Figura 6 con una interrupción de un minuto, tiempo corto para no alterar el ensayo. El peso de las tolvas es de alrededor de cero con la excepción del minuto de medida, en el que resulta 0.300 kg/s de grava y 0.133 kg/s de arena, proporción muy semejante a la composición del lecho. La cifra total de 0.433 kg/s es la más alta de los cuatro ejemplos. El máximo caudal sólido ensayado en la instalación ha sido 1.07 kg/s y la máxima pendiente 2.14%.

El cuarto ejemplo es un caso particular de alimentación pura, en concreto, el de un caudal sólido de alimentación nulo (las dos tolvas tienen la cinta extractora parada y la compuerta cerrada). El lecho es una mezcla de la misma arena y grava, aunque en proporciones distintas: 40% de arena y 60% de grava. La Figura 7 muestra el rápido crecimiento del peso en las tolvas debido a la erosión del lecho. El perfil

de fondo gira respecto a  $x = 0$  y la superficie libre acompaña al cambio de pendiente del fondo (Figura 7). El ensayo no ha alcanzado ni mucho menos el equilibrio después de 6 h, pues no habrá equilibrio hasta que la capacidad de transporte en el canal sea cero, pues el suministro de material es nulo. La pendiente inicial del lecho es 0.75%; al cabo de 6 h es 0.29%. El tiempo que tarda cada tolva en empezar a recibir el material erosionado es parecido al tiempo de reacción del ejemplo primero (la arena responde de manera más lenta que la grava, pues el camino es el mismo). La proporción entre las dos curvas de crecimiento es semejante a la proporción entre grava y arena en la composición del lecho.



**Figura 7.** Ensayo de un lecho de arena (1.4 mm, 40%) y grava (4.1 mm, 60%), caudal de 78.9 l/s y caudal sólido nulo. Arriba: peso en las tolvas. Abajo: perfiles del fondo y el agua en el canal, cada hora. Pendiente de la solera del canal 0.40%.

## Discusión

En este apartado se discute cómo relacionar tales ensayos en canal de laboratorio con tramos fluviales reales. La semejanza del lecho móvil en el canal con el prototipo de un río impone respetar algunos criterios, por ejemplo el número de Reynolds debe estar dentro del intervalo del régimen turbulento rugoso. Ahora bien, otros ensayos que estudian procesos (como el transporte sólido) son de hecho "sin prototipo". En todos los casos, un experimento grande, en cuanto al caudal, calado, caudal sólido y, por tanto, velocidad y turbulencia, aproxima el laboratorio a la realidad. El canal descrito es casi un río dentro del laboratorio si se toma en cuenta el caudal unitario máximo de  $270 \text{ l/s} / 0.75 \text{ m} = 0.36 \text{ m}^2/\text{s}$  y el caudal sólido unitario máximo  $1.07 \text{ kg/s} / 0.75 \text{ m} = 1.43 \text{ kg/s/m}$ .

La correspondencia con un río real se enfrenta en primer lugar a la pregunta de cómo un segmento representa el río continuo. Al cortar el río por una sección, identificada con el contorno aguas arriba de un canal, hay que representar el resto del río por su caudal líquido y sólido. Pero en la práctica el canal no puede trabajar sin recirculación, lo cual introduce una dificultad conceptual en la interpretación de los ensayos. Se supone que se ha dado una pendiente al lecho móvil del canal y se ensaya un caudal de agua. El caudal sólido resultante que sale del canal es igual a la capacidad de transporte con esa pendiente. Si, a continuación, se devuelve este caudal sólido a la cabecera en "recirculación pura", se estará alimentando el tramo con su propia capacidad. La recirculación significa entonces que un tramo imaginario aguas arriba, el que alimentaría al canal con cierto caudal sólido, sería exactamente igual al propio canal. En consecuencia, el río que se pretende simular en el laboratorio es idéntico a sí mismo hacia arriba en una longitud ilimitada. No es raro por ello que los cambios con respecto



al estadio inicial sean mínimos. Esto es una simplificación de la realidad, porque los ríos no son iguales a sí mismos al desplazarnos hacia arriba, sino que todas sus variables van cambiando: caudal, anchura y profundidad, granulometría, etcétera.

Si, en cambio, se establece un caudal sólido con las tolvas ("alimentación pura"), quedará determinada de forma unívoca una pendiente de equilibrio en el canal, dado el caudal de agua y el tamaño de grano. Este caudal sólido debería ser en realidad el que el río aporte al tramo desde aguas arriba, pero sobre este suministro de sólidos, a falta de medidas reales, sólo se pueden hacer hipótesis. Si se suministra un caudal sólido alto se causa una pendiente de equilibrio mayor, con acreción; si se alimenta con uno bajo, una pendiente menor, con incisión. ¿Qué significa entonces estudiar el equilibrio si la cantidad con que se alimente lo determina de modo arbitrario? La indeterminación del caudal sólido de alimentación del canal no se resuelve aplicando una fórmula de transporte sólido (¿es válida para el río que estudiamos?), sino sólo con medidas. No se resolvería tampoco, en rigor, enlazando otro tramo de canal aguas arriba del existente. Si bien esto último es irrealizable en el laboratorio, es la manera de razonar y actuar con un modelo numérico. Lo que se consigue alargando el tramo de estudio aguas arriba es tan sólo desplazar en la misma medida la indeterminación (la arbitrariedad); si bien la sensibilidad de la alimentación en cuestión va disminuyendo al alargar el tramo aguas arriba.

Lo que se acaba de plantear es una pregunta clásica de la hidráulica fluvial. Dado un caudal de agua sobre un fondo aluvial de cierto tamaño de grano, es posible pensar que el caudal sólido es resultado de la pendiente del fondo o, a la inversa, que la pendiente resulta del caudal sólido. ¿Cuál de las dos es la variable independiente y, en consecuencia, cuál la dependiente?; en el caso que se presenta en este trabajo, ¿cuál de las dos variables se debe imponer en un ensayo? La propiedad esencial del equilibrio (el perfil del fondo estable) ayuda en esta dificultad, pues cuando se alcanza un equilibrio es seguro que el caudal sólido de alimentación recirculando es igual a la capacidad de transporte del canal, manifestada como caudal sólido que sale. Entra y sale el mismo caudal sólido, o de lo contrario, por conservación de masa, no

estaría el fondo en equilibrio. La indeterminación del párrafo anterior se convierte por lo tanto en discrecionalidad, ya que habrá tantos equilibrios distintos como se quiera. En todos ellos, la alimentación sólida será igual a la capacidad de transporte del canal; en todos se espera alcanzar un régimen uniforme y una cierta pendiente de equilibrio; en todos, la alimentación determinará de forma unívoca la pendiente. Todos serán ensayos valiosos, pero no se sabrá cuál corresponde al río que se desea estudiar. De alguna manera, el ensayo en canal se desvincula del prototipo, no se puede anclar a él sin más información.

Una dificultad más surge cuando se reconoce que el transporte real de un río puede estar determinado no por su capacidad de transporte sino por la "disponibilidad" de material. Por ello, sobre el uso de fórmulas de transporte sólido para alimentar ensayos representativos de un río caben no una sino dos preguntas: además de ¿es válida la fórmula para el río?, hay que preguntarse ¿el transporte del río es igual a su capacidad o está controlado por la disponibilidad? La noción de disponibilidad refuerza que una alimentación verdadera es esencial, o sea refuerza el caudal sólido como variable independiente.

Como se ha dicho, la instalación combina recirculación con alimentación. Una particularidad de este modo híbrido de la instalación tiene que ver con la granulometría de los materiales. Si una fracción del material del lecho no fuera movida por el agua, o fuera movida en menor medida que su presencia en el lecho, contribuyendo así menos al transporte sólido, el caudal parcial de esa fracción salido del canal sería menor (Wilcock & McArdell, 1993), y así su presencia en la tolva correspondiente también iría siendo menor. Esto es más probable con los tamaños más gruesos y se llama "transporte parcial o selectivo". De manera inversa, esta fracción gruesa menos móvil participaría en el acorazamiento del lecho. En tal caso, los estados de equilibrio alcanzados en recirculación pura y en alimentación pura serían diferentes (Parker & Wilcock, 1993), pues lo recirculado tiene la composición de lo salido del canal, pero lo alimentado tiene siempre la misma proporción, igual a la del lecho inicial. En experimentos en que el agua mueve todas las fracciones de la mezcla del lecho casi por igual,

no de forma selectiva (“movilidad igualada”; Parker and Klingeman, 1982); esta diferencia en el equilibrio sería despreciable.

Con lo que se acaba de señalar, el modo híbrido de la instalación no se distingue de una alimentación pura, en la que el material viene de modo directo de los silos según cantidades constantes si cada tolva dosifica de manera invariable, preestablecida, a pesar de que su contenido vaya disminuyendo (o aumentando) durante el ensayo. Ahora bien, si la dosificación tiene en cuenta la variación del contenido, buscando que cada fracción alcance un peso constante, entonces el modo híbrido se diferencia de la alimentación pura. Esta posibilidad de regulación de la tolva hace que la instalación sea propiamente híbrida.

En muchos ensayos semejantes a los presentados no se ha observado en ningún caso un descenso del peso en la tolva de grava, compensado, para tener peso total constante, como exige el equilibrio, por un ascenso del peso en la tolva de arena, lo cual habría sido prueba de un transporte selectivo. Al buscar equilibrios con pendientes y cargas sólidas elevadas, pero siendo la arena bastante gruesa (1.4 mm) y la grava bastante fina (4.1 mm), se puede decir que se ha trabajado siempre en condiciones de movilidad igualada. Gracias a la medida del transporte de arenas y gravas en dos tolvas diferentes, la instalación es indicada para estudios de transporte parcial o selectivo. Precisamente, los cambios de peso de las tolvas servirían para medirlo. Del mismo modo, se distinguiría un proceso de acorazamiento de la superficie del lecho, si se diera.

## Conclusión

Se ha descrito una instalación para estudios de equilibrio fluvial con lechos de arena y grava. Es singular por sus grandes dimensiones, en particular por ser capaz de mantener ensayos de gran duración en que se transporte incluso 1 kg/s. La recirculación es imperativa para

manejar un ensayo con gran volumen de material granular, pero está indeterminado cuál debe ser el caudal de alimentación. Sólo medidas reales resuelven la indeterminación. La solución de que sea igual a la capacidad de transporte significa una simplificación de la realidad (el río no es uniforme aguas arriba). Pero esta identificación entre alimentación y capacidad es inherente al estudio del equilibrio y sirve para combatir la indeterminación, si bien al precio de volver arbitrario el ensayo. La instalación descrita gracias a su control independiente del transporte de arena y grava es indicada para el estudio del transporte parcial o selectivo. Los ejemplos explicados, tanto de erosión como de acreción, en modo de recirculación y de alimentación, han tenido en común ser ensayos de movilidad igualada.

## Nota

La instalación se encuentra en la Universidad de Castilla-La Mancha, España. Los autores se encargaron de proyectarla y ponerla en marcha. El segundo autor desarrolló en ella los experimentos de su tesis doctoral (Núñez-González, 2012).

## Referencias

- Marion, A., & Fraccarollo, L. (1997). Experimental investigation of mobile armoring development. *Water Resources Research*, 33(6), 1447-1453.
- Martín-Vide, J. P., & Andreatta A. (November, 2006). Disturbance caused by bed sills on the slope of steep streams. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 132(11), 1186-1194.
- Núñez-González, F. (junio, 2012). *Bedload transport of sand-gravel mixtures with Antidunes. Flume experiments* (tesis doctoral). Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

- Parker, G. (2008). Transport of gravel and sediment mixtures. En García, M. H. (ed.). *Sedimentation engineering*. Virginia, USA: ASCE, Reston.
- Parker, G., & Klingeman, P.C. (1982). On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research*, 18(5), 1409-1423.
- Parker, G., & Wilcock, P. R. (1993). Sediment feed and recirculating flumes: Fundamental difference. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 119(11), 1192-1204.
- Wilcock, P. R., & McArdell, B. W. (1993). Surface-based fractional transport rates: Mobilization thresholds and partial transport of a sand gravel sediment, *Water Resources Research*, 29(4), 1297-1312.