

# La ciencia del diseño para un metamodelo de regulación de agua potable y saneamiento básico

José Andelfo Lizcano Caro<sup>1</sup>  
Sandro Javier Bolaños<sup>2</sup>  
Rubén Javier Medina Daza<sup>3</sup>



## Resumen

En Colombia, la regulación del servicio público de acueducto, en sus componentes de inversiones, de operación y mantenimiento, se ha realizado por actividades y por métodos de eficiencia relativa. La actividad inicial se ha establecido en la captación; la final, en la distribución. Esa concepción excluye otras actividades que garantizarían mayores caudales y ofrecerían mejores condiciones para el suministro de agua en horizontes de largo plazo. Desde el diseño de investigación de ciencias (DSR), y la definición de artefactos, se abordarán soluciones introductorias, para contribuir a la comprensión de la complejidad de los sistemas de agua potable.

## Palabras clave

Agua potable. Artefacto. Ciencia. Diseño  
Investigación. Metamodelo. Regulación.

<sup>1</sup> jalizcanoc@udistrital.edu.co

<sup>2</sup> bsandrojavier@gmail.com

<sup>3</sup> rmedina@udistrital.edu.co

## Introducción

Desde el principio Aristotélico de la causa como esencia racional de la sustancia [1], en el propósito de la investigación de un metamodelo de regulación para agua potable en horizontes de largo plazo, uno de los posibles productos de la *ciencia basada en el diseño*, son las premisas de los artefactos de investigación [2], que permiten entender la propuesta y alcanzar mejores resultados de los que se obtienen empíricamente. El artefacto de investigación que, en una fase preliminar se explora como solución, se centra en los procesos de prestación del agua potable. Los principales procesos de integración a considerar son los de: producción de agua, sistemas de captación, tratamiento, conducción, distribución y comercialización. Las *iteraciones* se expresarán para los métodos estadísticos de sistemas de aducción por niveles de complejidad. Estos procesos serán la capa superior del suministro del servicio de agua potable. Desde una perspectiva regulatoria, de allí se derivan criterios socioeconómicos de suficiencia financiera y eficiencia económica; y de subsidios junto con sus aportes solidarios.

Metodológicamente, el diagrama de secuencia [2] se simplifica en problemas de situación, de definición y de estado; en bases axiológicas y descriptivas; percepción e indicadores de gestión y resultados; planeación y configuración; y finalmente la creación, diseño y representación. Basados en distintos modelos utilizados para predecir demandas futuras de agua en horizontes de planeación de largo plazo, el artefacto de la investigación, desde la perspectiva de Ingeniería de Software y *ciencia basada en el diseño*, se expondrá desde un método de investigación que articule los casos de metamodelos de escasez y demanda. Las estadísticas usadas en este artículo, son el resultado de dos investigaciones ya finalizadas<sup>4</sup>; cuya información representa el insumo necesario para la generación del metamodelo aquí expuesto. Ello, como un intento de aplicación científica del diseño en las ciencias relacionadas con la ingeniería a un caso de regulación en servicios públicos básicos.

## Marco teórico

### 2.1 Ciencia del diseño (S + D)

Una de las concepciones del diseño de las ciencias está en el esfuerzo de crear cosas que sirvan a

4 "Distorsiones socioeconómicas del régimen tarifario de agua potable y saneamiento básico" y "Metodología y modelo socioeconómico para estimar consumos básicos de subsistencia de agua potable en Colombia" Fueron avaladas por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital. Sus códigos de referencia son: 2308104006 y 38129712

propósitos humanos. Como marco científico, March y Smith (1995) describen el diseño desde dos ejes, referidos a las actividades de investigación y los resultados obtenidos de ellas. Entre las actividades, están la teorización, la justificación y los artefactos. Como resultados: los métodos y ejemplificaciones y los modelos y las construcciones [1].

Consecuente con este paradigma, el profesor Wieringa plantea que el Diseñador debe responder preguntas pertinentes a los problemas humanos a través de la creación de artefactos innovadores, contribuyendo así a la generación de nuevo conocimiento, con evidencia científica [2]. Ello, para: i) legitimar la ciencia del diseño como un válido método de hacer investigación en el campo, y ii) para aplicación de diseños en otras disciplinas y para su revalidación a partir de ellas. Para ello, los artefactos son uno de los productos de los diseños que buscan dar respuesta más allá de sistemas aislados, que permitan modificar situaciones existentes para la obtención de mejores resultados [3].

### 2.2 Actividades de prestación en agua potable

En los países latinoamericanos, el servicio público domiciliario de agua potable o servicio de acueducto, se entiende como la distribución de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición [1]. Para su debida prestación, como lo dispone el Reglamento Técnico del Sector [2], se deben incorporar las actividades de captación de agua y su procesamiento, tratamiento, almacenamiento, conducción y transporte. Las actividades expuestas aluden a infraestructura tecnológica y de ingeniería, pero excluyen la generación de agua, como un bien natural. Al punto que el régimen legal colombiano dispone que la conservación de las cuencas hidrográficas no hace parte del servicio público de agua potable [3].

Pese a estos distorsionados mandatos, que por una ruta procuran la prestación universal de servicios públicos con calidad; y por la otra, marginan los sistemas hidrológicos de la cadena de prestación, a los reguladores les imponen el deber de fijar las reglas y pautas técnicas, económicas y comerciales para garantizar el suministro de servicios [4], tanto en el presente, como en el futuro.

### 2.3 El equilibrio imperfecto de la regulación

Bien sea bajo regímenes de libertad regulada o vigilada, el Regulador debe buscar que los agentes, que atienden el mercado de usuarios, compitan por servicios de calidad. A partir de los resultados de la

Investigación a las distorsiones socioeconómicas del régimen tarifario de agua potable [8], a se diseñan la matriz criterios e intereses de actores, respecto de criterios universales que soportan los regímenes de los servicios públicos, como los de suficiencia financiera y eficiencia económica; al igual que los de solidaridad y redistribución de ingresos y neutralidad y transparencia [5].

Tabla N. 1. Criterios tarifarios de interés por actores

CRITERIO	ESP	USUARIO	DISTORSIÓN
Suficiencia financiera	Recuperar costos y obtener remuneración	Empresas viables.	Captura del regulador para subir precios techo
Eficiencia económica	Competitividad en el mercado. Maximiza utilidad (precios techo)	Para menor tarifa y/o mejor servicios de mayor estándar	Asimetrías de información para modelos de eficiencia relativos (comparación)
Solidaridad	Mayor eficiencia de recaudo	Subsidios y aportes cruzados. Inversiones estatales	Subsidios a la oferta que aumentan la exigencia de recursos
Estabilidad regulatoria	Recuperación de inversiones. Reglas claras.	Garantía futura de SP	En crisis, las empresas presionan por mayores tarifas, con amenazas de racionamientos
Simplicidad y transparencia	Reglas claras	Control social	Regulación económica compleja y usuarios son representación precaria

Fuente: los autores

Además, por la cuantía de los costos en infraestructura, caracterizadas por costos hundidos y recuperación de inversiones en el largo plazo –con mayor riesgo–, la prestación del agua se da por monopolios naturales. Ello implica que el regulador deba, artificialmente, diseñar una competencia, y realizar comparaciones entre empresas con distintas configuraciones en sus sistemas, calidades disímiles de aguas crudas, mercados heterogéneos, topografías y climas diversos y distintas culturas [5]. Las asimetrías de información, que le pertenece a las empresas y las presiones para que les reconozcan un mayor riesgo al existente y les permitan incorporar altas pérdidas y mayores aumentos en las tasas de descuento, entre otras razones, conlleva a la denominada “captura

del regulador” [6]. Esa tensión a la que es sometido el Regulador: por las empresas, los gobiernos, los gremios y los usuarios y sus organizaciones, lo lleva a transitar por una cuerda inestable. Desde los dos extremos de la soga, hemos construido la analogía del equilibrista. Veamos las ilustraciones.

Ilustración N. 1. Diseño del problema: Equilibrio regulatorio inestable



Fuente Lizcano J. Investigación Modelo de Regulación de AP

Al usuario le interesa que los servicios sean prestados con calidad y eficiencia [14]. En tanto, el Regulador parte de una realidad sectorial dominada por prestadores que se oponen a la vigilancia, piden modelos anti intrusivos y exigen libertad de empresas junto con garantías estatales [11]. El tránsito por la cuerda (figura N. 1), lo cursa el regulador con un listón de apoyo. El recorrido ilustra los diferentes trayectos e incertidumbre propios del sector. La red que lo puede proteger, está tejida de: decisiones regulatorias como los precios techo; la planeación de inversiones y suministro de agua a largo plazo; el control y la estabilidad regulatoria; y la participación de capital público y privado [11].

**Diseño categorial de actividades de suministro**

La hipótesis central de la investigación del “Metamodelo de regulación para agua potable y saneamiento básico” parte de la premisa que puede haber un mayor uso racional y eficiente del agua, y que ello puede ser regulado de mejor manera desde un metamodelo que soporte el lenguaje de solución a problemas como la definición de franjas de consumos: vitales, básicos, complementarios y suntuario.

Como complemento, se plantea que la variable demanda de agua potable y saneamiento básico (APSB) se ha determinado por las empresas de servicios públicos bajo regímenes de libertad vigilada, capturando al regulador. Para alcanzar criterios de eficiencia, se requiere definir modelos para estimar horizontes de planeación (HVPD) y valores presentes de demanda de largo plazo (VPDLP), bajo un régimen de libertad regulada intrusivo.

### 2.4.1 Actividades de prestación de acueducto y alcantarillado

En términos del régimen de los servicios públicos, de la regulación vigente [1] y de los reglamentos técnicos [7], los alcances de las actividades de suministro son:

**Planta de potabilización.** Son las instalaciones necesarias de tratamientos unitarios para purificar el agua de abastecimiento para una población.

**Sistema de distribución de agua potable.** El sistema de distribución de agua potable está constituido por el conjunto de redes locales que conforman el sistema de suministro del servicio público domiciliario de acueducto.

**Red matriz.** Parte de la red de distribución que conforma la malla principal de servicio de una población y que distribuye el agua procedente de la conducción, planta de tratamiento o tanques de compensación a las redes secundarias. La red primaria mantiene las presiones básicas de servicio para el funcionamiento correcto de todo el sistema.

**Sistema de conducción de agua potable.** el conjunto de tuberías empleadas para el transporte de agua potable, desde la fuente de captación hasta la planta de tratamiento, o de ésta hasta los tanques de almacenamiento a partir de los cuales se alimenta el sistema de distribución.

Dependiendo de los criterios básicos y requisitos mínimos que deben cumplir las aducciones, conducciones y líneas de impulsión en los diferentes procesos involucrados en su desarrollo, tales como la conceptualización, el diseño, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento, con el fin de garantizar seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia, se determina el nivel de complejidad de los sistemas. De ello, dependen aspectos como los métodos de cálculo a utilizar para el diseño del sistema de aducción.

Tabla N. 2. Métodos de diseño por nivel de complejidad

Método de posible uso para diseños de aducción	Bajo	Medio	Medio alto	Alto
Aritmético, Geométrico y exponencial				
Aritmético + Geométrico + exponencial + otros				
Por componentes (demográfico)				
Detallar por zonas y detallar densidades				

Fuente: RAS 2000

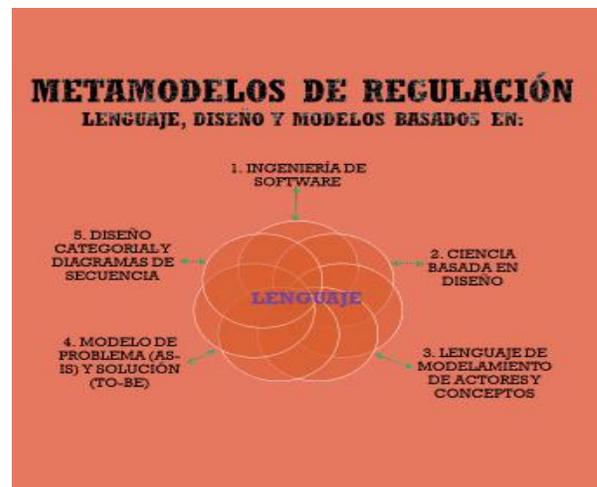
Si bien en el diseño de los proyectos se deben definir criterios técnicos y económicos que permitan comparar todas las alternativas posibles para la aducción a partir de los datos de campo, de los datos geológicos y de los datos de consumo de la población que se abastecerá, faltan criterios ambientales y de mínimo costo [8]. Dependiendo de la topografía, la distancia y la diferencia de nivel entre la captación y la planta de tratamiento, la aducción puede hacerse a través de una tubería a presión o un canal abierto. Ello, de conformidad con los Reglamentos Técnicos Sectoriales [2].

Para los análisis hidráulicos, se entran a considerar las operaciones y maniobras de cada sistema; al igual que los niveles de presión y caudales y el tipo de canales y obras de arte requeridas.

### Solución y resultados

El estudio de la predicción de consumos de agua, en horizontes de planeación, es necesario como estrategia de gestión de demanda y sostenibilidad de cualquier país o región. Ello es coherente con mandatos como los dispuestos en la Directiva Marco de Aguas de la Unión Europea, trazado hasta el 2015 [12]. Desde un modo de análisis proactivo de la investigación del diseño, la estructura dentro de la cual se encuentra inmerso el artefacto desde la Ciencia Basada en Diseño del diseño que nos permite obtener los metamodelos [13] de solución para regular el suministro de agua potable, en perspectivas de planeación de largo plazo, está soportada en ingeniería de software, en modelamiento de actores y conceptos, en el modelo de problemas (AS-IS) y soluciones (TO-BE) [22] y en un diseño categorial de diagramas y secuencias [11].

Ilustración N. 2. Diseño del lenguaje para metamodelos de regulación



Fuente: Lizcano J. Investigación Modelo de Regulación de AP

El aporte central del diseño de investigación es el lenguaje que soporta los procesos de prestación del servicio de agua potable. En una estructura vertical de actores y conceptos se derivan los procesos de gestión y resultados y las actividades de suministro, aplicables al sector de agua potable y saneamiento básico. Lo expuesto, se describe en el siguiente modelo:

Ilustración N. 3. Diseño de estructura por actores y conceptos



Fuente: Lizcano J. Investigación Modelo de Regulación de AP

La identificación de los actores y los conceptos son la base de secuencial de la estructura del sector de los servicios públicos, para definir el diseño de los procesos y las actividades de prestación. Las funciones y estructuras nos conducen a un sistema de máquinas de proceso, donde las salidas esperadas son la gestión y los resultados, en términos de sostenibilidad para el suministro futuro.

3.1 Diseño de los metamodelos de solución

Soportados en las dos estructuras anteriores, se inicia el diseño de los metamodelos de solución esperados. A nivel de estudios de caso, se representan los de cambio climático y consumo de agua. En el metamodelo de cambio climático se concibe la bioeconomía [15] como la síntesis de las ciencias denominadas duras: física, biología, ecología y matemática, para desde sus bases científicas, buscar de manera interdisciplinaria soluciones ambientales y económicas sostenibles.

Ilustración N. 4. Metamodelo para escases de agua



Fuente: Lizcano J. Investigación Modelo de Regulación de AP

Ante la magnitud de la perspectiva del crecimiento demográfico y el ascenso social de las clases medias, y las exigencias de la población de servicios públicos básicos de agua y saneamiento, el mayor riesgo recae sobre el sostenimiento ecológico. Estos desequilibrios imponen los retos de reestudiar la demanda, desde hábitos de consumo alterados con el desarrollo tecnológico. También, se debe reevaluar la oferta, desde la revisión del sistema productivo y la detección de soluciones, desde la ingeniería y la tecnología, más eficientes y que mitiguen los daños ambientales [15].

Allí, en las actividades expuestas para el servicio de acueducto, se hace evidente la necesidad de incorporar, como actividad central, las inversiones ambientales [17] y la producción del agua, con el propósito de garantizar el ordenamiento y protección de las cuencas y fuentes de agua. Esa actividad que no hace parte del servicio público domiciliario de acueducto, debe incorporarse. La perspectiva del metamodelo expuesto aporta para su dimensionamiento e interacción.

Con la construcción de metamodelos como el de cambio climático, se puede lograr el cambio en la percepción de las relaciones entre los sistemas naturales y los asociados al suministro de servicios públicos, logrando un mejor rendimiento de un nuevo sistema que se articula como un todo [18].

Trabajos futuros

Establecido el fundamento para el conocimiento y comprensión de las ciencias del diseño para resolver problemas de falta de regulación para proyectar adecuadamente la dotación de servicios públicos, en una siguiente fase se deben ampliar las soluciones que conlleven a las aplicaciones requeridas, en términos de cálculo de horizontes de planeación, de la medición matemática de efectos elasticidad precio de la demanda, de líneas de consumo y de reducción de pérdidas de agua, minimizando las distorsiones recurrentes en los distintos modelos.

Dentro de la investigación doctoral [11] para el Metamodelo de Regulación de Agua Potable, en consecuencia con el presente tema, lo que sigue es soportar cada una de las soluciones de diseño para resolver problemas referidos a la eficiencia relativa y absoluta y la revalidación del concepto de los servicios de acueducto y alcantarillado y de la regulación que se requiere para proyectar la prestación futura de servicios públicos, generando, epistemológicamente, nuevos lenguajes.

## Conclusiones

Desde la analogía del equilibrio imperfecto, como ruta de solución a la carencia de modelos de regulación de agua potable que creen nuevos lenguajes para la obtención de uno o varios metamodelos de solución, y que vayan más allá de la dimensión económica y financiera, se ha expuesto, de manera introductoria, cómo, desde un proyecto de ciencia basado en el diseño, se pueden comprender los componentes principales de los servicios públicos domiciliarios de agua potable, que es el objeto de estudio, y las actividades centrales de diseño y la construcción del artefacto de investigación. Para el diseño, se partió de los criterios económicos y sociales, que son la base de los modelos. A las actividades centrales de la prestación de los servicios, le hemos agregado las de tipo complementario. Desde allí, se replantea la necesidad de incorporar la actividad de producción del agua, comúnmente excluida de las regulaciones.

Para el suministro del servicio de agua potable y la recolección de vertimientos líquidos y su disposición, se ha expuesto cómo los diseños deben ir más allá de los reglamentos técnicos sectoriales, que si bien sientan normas de tecnología e ingeniería, como dimensiones de obra, métrica de caudales y unidades de observación, deben incorporar con mayor decisión los sistemas naturales de riesgo, la escasez del agua y la preservación de humedales o su recuperación. Como principios para la construcción del metamodelo para regular el suministro de agua potable en horizontes de largo plazo, se ha demostrado: i) el año o periodo base debe hacer parte de los cálculos de proyección, al no incluirse, se generan distorsiones, como las expuestas; ii) mantener amplias brechas en los diseños de las proyecciones de los índices de agua no contabilizada y los niveles de pérdidas de regulación, aumentan la incertidumbre en las proyecciones y emiten señales negativas para el uso racional y eficiente del agua; iii) para lograr mayor flujo financiero, las empresas procuran proyectar menos volúmenes de agua respecto de los requeridos; y iv) por lo anterior, para evitar asimetrías y mayor objetividad en las proyecciones de volúmenes de agua, el metamodelo de regulación debe deslindar la dimensión financiera de las proyecciones técnicas y ambientales.

Desde los paradigmas de la ciencia basada en diseño S+D, se puede lograr la interacción de las actividades de prestación del servicio de agua potable y las relaciones inversas de las actividades complementarias de alcantarillado.

## Agradecimientos

Al doctor Nelsón Pérez Castillo, director del Seminario de Investigación II, del Doctorado en Ingeniería, por sus enseñanzas y por compartir sus experiencias científicas y vivencias de su producción académica. Y al Centro de Computación de Alto Rendimiento –CECAD-.

## De los autores

**Jose Andelfo Lizcano Caro:** docente tiempo completo Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Candidato a doctor en Ingeniería Universidad Distrital. Msc. Urban and Regional Planning. jalizcanoc@udistrital.edu.co

**Sandro Javier Bolaños:** Ingeniero de sistemas, profesor de planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magister en Teleinformática – Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Colombia. Doctor en Informática – Universidad Pontificia de Salamanca – España. bsandrojavier@gmail.com

**Rubén Javier Medina Daza:** docente tiempo completo Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctor en Informática, énfasis GIS – Universidad Pontificia de Salamanca – España. rmedina@udistrital.edu.co

## Bibliografía

- [1] S. SALGADO, La Filosofía de Aristóteles, Duererías, 2012.
- [2] J. P. y. P. E., An Introduction to Design Science, Switzerland: Springer, 2014.
- [3] B. G. y. Otros, El Lenguaje Unificado de Modelado UML, Addison Wesley, 2014.
- [4] A. OSTERWALDER, «The business model Ontology. Tesis doctoral,» Universite de Lausanne, 2004.
- [5] R. WIERINGA, Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [6] P. D. y. V. J. Dresch A., Design Science. Research A Method for Science and Technology Advancement, Porto Alegre. Brazil.: Springer, 2015.
- [7] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, Resolución integral 151, Bogotá, D.C., 2001.
- [8] Gobierno Nacional de Colombia, Reglamento Técnico del Sector para Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS-, Bogotá, D.C., 2000.
- [9] Congreso de Colombia, Ley 142. Artículo 161, Bogotá, D.C., 1994.
- [10] D. Newbery, «Determining the regulatory asset base for utility price regulation.» Utilities Policy. , vol. 6, n° 1, pp. 1-10, 1997.
- [11] J. o. Lizcano, «Distorsiones socioeconómicas del régimen tarifario de agua potable y saneamiento básico,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., 2011.
- [12] J. Lizcano, Investigación al régimen tarifario de agua potable y saneamiento básico, Bogotá, D.C.: Fondo de Publicaciones Universidad Distrital, 2011.

- [13] B. F., «Corrupción y captura en la Regulación de los servicios públicos,» *Economía Institucional*, vol. 7, n° 13, 2005.
- [14] P. Spiller, «Plan de Acción y Estrategia Regulatoria,» 2000.
- [15] L. J., «Modelo de regulación para agua potable en horizontes de largo plazo. Proyecto de investigación doctoral. Doctorado en Ingeniería,» CIDC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., 2015.
- [16] Ministerio de Desarrollo Económico, «Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Sección III. Título B. Sistemas de Acueducto,» Bogotá, 2000.
- [17] J. SILVA, Tesis de doctorado: Bienes públicos e interés colectivo: la prestación del servicio público domiciliario de agua potable en Bogotá., Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [18] C. d. R. d. A. P. y. S. Básico, Primer periodo tarifario de agua potable para Colombia. Resolución 08., Bogotá: Diario Oficial, 1995.
- [19] URS Corporation—Oakland, California & Maddaus Water Management—Alamo, California, «Wholesale Customer,» San Francisco: USA., 2004.
- [20] F. DAZA, «Tesis Doctoral. Demanda de Agua en Zonas Urbanas en Andalucía,» Universidad de Córdoba, Córdoba, España, 2008.
- [21] S. J. y. Z. Q. & Y. D., «Statistical modeling of daily urban water consumption,» *Water Resources Research*, vol. 46, n° 3506, pp. 2-10, 2010.
- [22] J. A., TOGAF Versión 9.1, The Open Group, 2013.
- [23] M. HELFERT, Design Science: Perspectives from Europe. Revised Selected Papers., Dublin, Ireland.: European Design Science Symposium, EDSS 2013. , 2013.
- [24] OCDE, «The Bioeconomy to 2030. (2009),» de Designing a policy agenda, 2009.
- [25] G. ANLLO, «Bioeconomía y los desafíos futuros,» *El Estado de la Ciencia*, n° Del año 2013, pp. 45-68, 2014.
- [26] N. y. B. J. ALEXANDRATOS, «World agriculture towards 2030/2050,» *FAO Agricultural. ESA Working*, vol. 03, n° 12, 2012.



## FE DE ERRATAS

Durante el proceso de edición del artículo “Creación de un metaverso en Opensim para la Universidad Distrital dentro de la red RITA-UD” publicado en el Volumen 3, número 2, pp. 51-60 del año 2012, se adicionó un quinto coautor incorrectamente; por ello presentamos excusas y anunciamos que la corrección ya fue aplicada en el portal de la Revista electrónica.