

El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico?

**Carlos Costa Posada, Efraín Domínguez
Calle, Hebert Gonzalo Rivera, Raquel
Vanegas Sarmiento**

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
– IDEAM

Grupo de Investigación en Hidrología

Recibido 16 de septiembre de 2005, aproba-
do 30 de octubre de 2005.

PALABRAS CLAVE: Índice de escasez de agua, relación
oferta demanda de agua, indicadores ambientales

KEY WORDS: Water scarcity Index, water supply and
demand relationship, environmental Indicators

RESUMEN El seguimiento a la sostenibilidad del uso del agua es fundamental para orientar la gestión pública y privada del recurso hídrico (hacia un desarrollo sostenible). Por esta razón, desde 1998, el IDEAM calcula el índice de escasez hídrico para los municipios de Colombia. Recientemente, la Comunidad Andina de Naciones (CAN), con el respaldo del Programa Hidrológico Internacional de UNESCO adoptó la propuesta del IDEAM de usar este índice y su metodología de construcción como el indicador común para orientar la gestión del agua en los países andinos. Este índice resulta del análisis de la relación entre la oferta hídrica disponible y la demanda de agua por parte de las actividades socioeconómicas. En los casos en que la demanda de agua representa más del 20% de la oferta neta de agua disponible en una región, este índice activa señales invocando gestión, tanto en la protección de la fuente como en el control de la demanda, y en casos extremos la consecución de fuentes adicionales de agua, de manera que se reduzca el riesgo de desabastecimiento de agua en el futuro (OMM, 1997). Este artículo presenta los elementos conceptuales del índice de escasez de agua en Colombia, y un análisis de su impacto a partir de su aplicación en un caso puntual.

ABSTRACT Monitoring sustainability of water use is key to direct public and private decision making towards sustainable development. To this aim IDEAM has calculated the shortage index (Scarcity Index) since 1998 for all municipalities in Colombia. Recently, the Andean Community (CAN), with the support of the International Hydrological Program of UNESCO, adopted IDEAM's proposal to use this index and its methodological approach to calculate it as a common indicator to direct decision making in the Andean Countries. This index corresponds to the relation between water Availability and water demand from all socio-economical activities. In the cases where water demand represents more than 20% of water Availability in a region, the index activates alert signals calling for action both to protect the water source and control demand and in extreme cases to integrate new water sources in order to reduce the risk of future unsatisfied demand (OMM, 1997). This article describes the index and analyzes its utility through its application in a particular case.

MODELO CONCEPTUAL DEL ÍNDICE DE ESCASEZ

El agua constituye un elemento vital para la existencia de los seres humanos, y para el bienestar del entorno ambiental en el que estos desarrollan sus actividades sociales y productivas. El desarrollo de estas actividades influye, directa o indirectamente, en las fuentes proveedoras de agua. La explotación exagerada de una fuente puede tener efectos sobre las características de la calidad del agua ofrecida y alterar su dinámica de flujo, al tomarla de algunas fuentes abastecedoras y verterlas, la mayoría de las veces, contaminada en otros cuerpos de agua. Finalmente, la excesiva presión sobre una fuente de agua puede conducir a su desaparición. En este sentido, es importante para las labores de planificación sostenible del recurso conocer la cantidad de agua disponible ofrecida por la fuente, los niveles de demanda y las restricciones de uso necesarias para mantener la salud de la fuente abastecedora. Es decir que, además de ofrecer agua para consumo humano y abastecimiento de las actividades productivas, es necesario que la corriente mantenga de manera permanente un remanente de agua para atender otros bienes y servicios ambientales, ofrecidos por la corriente como suministro de agua de los ecosistemas asociados, albergue de la biodiversidad acuática y recreación, entre otros. Aunque a veces insuficiente, esta restricción generalmente se atiende dejando que, por el cauce, escurra al menos el caudal mínimo histórico, reduciéndose así la oferta real disponible para consumo de agua.

Otros factores afectan la disponibilidad real de agua, entre ellos la variabilidad del régimen hidrológico de las fuentes abastecedoras y la calidad de la misma. Una corriente con un régimen hidrológico muy variable es poco confiable como fuente abastecedora de agua, por lo que la irregularidad temporal de la fuente debe ser tenida en cuenta al estimar la oferta de una corriente de agua.

Por las razones anteriores es conveniente definir dos tipos de oferta: a) oferta total que refleja el agua que circula por la fuente abastecedora y b) oferta neta que define la cantidad de agua que ofrece la fuente luego

de haber descontado la cantidad de agua que debe quedar en ella para efectos de mantener la dinámica de aguas bajas (de estiaje o caudales mínimos) y para tomar en cuenta los efectos adversos de la irregularidad temporal de la oferta. Tomando en cuenta estas definiciones el índice de escasez se establece como la siguiente relación:

$$(1) \quad I_e = \frac{D}{O_n} \times 100\%$$

Donde: I_e - Índice de escasez [%], D - Demanda de agua [m^3], O_n - Oferta hídrica superficial neta [m^3].

DEFINICIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

La oferta hídrica total está definida por el valor modal de los caudales promedio anuales o caudal modal. Esta magnitud representa el caudal anual promedio más probable y se extrae de la curva de densidad probabilística (CDP) de los caudales anuales. Esta serie se construye a partir de los registros en las estaciones hidrométricas que miden el flujo de agua de la fuente abastecedora. Como en el país no se cuenta con información hidrológica puntual para cada municipio, se propone usar la metodología de la UNESCO (1979) para extraer estos valores de regionalizaciones hidrológicas, de mapas de isorendimientos modales o de ejercicios de modelación que cumplan con todas las etapas de los protocolos de modelación hidrológica, especialmente con la de validación del desempeño de los modelos propuestos (Domínguez, 2000).

A su vez la oferta hídrica superficial neta resulta de la siguiente expresión:

$$(2) \quad O_n = O_t \times (1 - R_e + R_{it})$$

Donde:

O_t : Oferta hídrica superficial total [m^3];

R_e : Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje;

R_{it} : Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

El análisis de las formulas (1) y (2) demuestra que el índice de escasez requiere de la definición de cuatro elementos conceptuales, tres de ellos relacionados con la categoría de oferta hídrica superficial y el restante relacionado a los elementos del agua demandada por las actividades socioeconómicas.

La oferta total se expresa como:

$$(3) \quad O_t = Q_o * T$$

Donde: Q_o - caudal modal en la fuente abastecedora [m^3/s] y T - cantidad de segundos en el intervalo de agregación del índice del escasez de agua.

Para definir R_e se construye la función de distribución probabilística (FDP) de los caudales de estiaje ($P(Q_{min})$). De la FDP se obtiene el caudal de estiaje con el 97.5% de probabilidad de excedencia $Q_{min 97,5\%}$, de modo que la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente sería igual a:

$$(4) \quad R_e = \frac{Q_{min 97,5\%}}{Q_o}$$

La reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica debe ser función de los coeficientes de variación (C_V) y de asimetría de los caudales promedio anuales (C_S) y del radio de correlación de la función de autocorrelación de los caudales diarios (D). Este último representa la memoria temporal del régimen de caudales. En ríos de planicie el radio de correlación es mayor que en los ríos de montaña. La mayor reducción R_{it} tiene lugar en las corrientes en las que el caudal anual modal es bajo, el coeficiente de variación es alto, la asimetría positiva y el radio de correlación es tendiente a 0. Por el contrario en los ríos donde $C_V \rightarrow 0$, $C_S \ll 0$, $D \gg 0$ y el caudal anual modal es alto está reducción será mínima.

Sin embargo, ante limitaciones como la corta longitud de las series de caudales anuales y de estiaje (30 años en promedio) y la complejidad del parámetro D , como primera aproximación para obtener R_{it} se recomienda aplicar la tabulación presentada en la Tabla 1.

C_V	R_{it} , [%]
0 - 0,2	15
0,2 - 0,3	25
0,3 - 0,4	35
0,4 - 0,6	40
>0,6	2

Tabla 1. Escala de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica

DEFINICIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA

El país no cuenta con un sistema de información continuo y homogéneo sobre el uso del agua en todo el territorio nacional y para todos los sectores. Dicho sistema sería conveniente para contabilizar el volumen de agua usada en el desarrollo de actividades socioeconómicas, a partir de mediciones directas del volumen utilizado. Sin embargo, una buena aproximación a la demanda hídrica se puede obtener a partir de los volúmenes de producción sectorial y de factores de consumo de agua por tipo de producto o servicio. En este escenario la demanda total D_t de agua es igual a:

$$(5) \quad D_t = D_{ud} + D_{ui} + D_{us} + D_{ua} + D_{up}$$

El cálculo de la demanda de agua para consumo doméstico D_{ud} - [m^3] se realiza utilizando la siguiente expresión:

$$(6) \quad D_{ud} = D_{pcu} \times n_{hu} + D_{pcr} \times n_{hr}$$

Donde: D_{pcu} - demanda per cápita urbana, n_{hu} - número de habitantes urbanos, D_{pcr} - demanda per cápita rural, n_{hr} - número de habitantes rurales.

La demanda de agua para uso industrial D_{ui} - [m^3] se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$(7) \quad D_{ui} = \sum_{i=1}^n Vp_i \times Fc_{ji}$$

Donde: Vp_i , Fc_{ji} son el volumen de producción y factor de consumo de agua por tipo producción y n es el número de sectores industriales considerados (MAVDT, 2000).

La demanda de agua para el sector de servicios D_{us} - [m³] se obtiene como

$$(8) \quad D_{us} = \sum_{i=1}^n N_i \times FCS_i$$

Donde: N_i y FCS_i representan el número de establecimientos por tipo de servicio y el factor de consumo por tipo de servicio. Aquí n representa el número de tipos de servicios tomados en cuenta.

Los requerimientos del uso agrícola D_{ua} - [m³] se establecen mediante la siguiente fórmula:

$$(9) \quad D_{ua} = \sum_{i=1}^n D_{ua}^i ;$$

$$D_{ua}^i = \begin{cases} 0 & \Rightarrow \text{Si } [P - (ETP * kc_i)] \geq 0 \\ \text{abs}[P - (ETP * kc_i)] * ha_i & \Rightarrow \text{Si } [P - (ETP * kc_i)] < 0 \end{cases}$$

Aquí: D_{ua}^i - Demanda del i -ésimo cultivo, P - precipitación anual, ETP - es la evapotranspiración potencial, kc_i - es el factor de consumo del i -ésimo cultivo y ha_i el número de hectáreas cultivadas con él. Por último, n representa el número de cultivos considerados.

La demanda para uso pecuario D_{up} - [m³] es:

$$(10) \quad D_{up} = \sum_{i=1}^n Vpa_i \times Fca_i$$

En (11) Vpa_i constituye el volumen de producción por tipo de animal industrial, Fca_i es el factor de consumo según tipo de animal y n representa el número de tipos considerados.

ESCALA DE VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ DE AGUA

Se registra escasez de agua cuando la cantidad tomada de las fuentes existentes es tan grande que se suscitan conflictos entre el abastecimiento de agua para las necesidades humanas, las ecosistémicas, las de los sistemas de producción y las de las demandas potenciales.

Las recomendaciones del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, a partir de la práctica mundial en la gestión del agua, ha permitido determinar los umbrales críticos de presión sobre el recurso hídrico (OMM, 1997; IDEAM, 2000), distinguiéndose cuatro categorías:

- a) Alto – la demanda alcanza el 40% del agua ofrecida potencialmente por la fuente abastecedora.
- b) Medio – el nivel de demanda de agua se encuentra entre el 20 y 40% de la oferta.
- c) Moderado – Los requerimientos de agua están entre el 10 y el 20% de la oferta hídrica.
- d) Bajo – la demanda de agua no supera el 10% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente.

APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ A LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA

Con el fin de discutir el cálculo y la aplicación del índice de escasez en Colombia, a continuación se presentan los resultados de su aplicación a los municipios asentados en la cuenca del río Pamplonita en Norte de Santander.

Primero, se parte de definir las ofertas hídricas totales y netas de la cuenca a través del análisis estadístico de los caudales anuales y de estiaje de la estación hidrológica del IDEAM La Don Juana (código en la red del IDEAM: 1601702). Los estadísticos de estas series se utilizaron para definir las reducciones para mantener el régimen de estiaje y por irregularidad de la oferta. Las series de tiempo utilizadas cuentan con una longitud de 30 años y fueron complementadas y homogeneizadas utilizando la metodología presentada en (Nieto, 1998; Martínez y Ruiz, 1998;

Municipios	Demanda Total, [m ³]	ÍNDICE DE ESCASEZ					
		Año Modal Oferta Modal, [m ³]	Índice de escasez modal	Categoría	Año Seco Oferta con probabilidad de excedencia 97.5%, [m ³]	Índice de escasez 97.5%	Categoría
Cúcuta	54.665.228	230.259.800	24,00	Medio	107.300.563	50	Alto
Villa del Rosario	2.637	18.823.580	0,00	Bajo	8.771.747	1,0	Bajo
Los Patios	3.500.338	25.874.168	14,00	Moderado	12.057.306	30	Medio
Bochalema	22.875.627	34.460.067	66,00	Alto	16.058.316	140	Alto
Chinácota	8.915.098	33.402.994	27,00	Medio	15.565.722	60	Alto
Ragonvalia	682.185	20.358.018	3,00	Bajo	9.486.792	7,0	Bajo
Pamplonita	21.258.443	36.623.688	58,00	Alto	17.066.558	120	Alto
Herran	113.324	21.376.647	1,00	Bajo	9.961.471	1,0	Bajo
Pamplona	19.686.560	60.808.351	32,00	Medio	28.336.559	70	Alto

Tabla 2. índice de escasez de agua en la cuenca del río Pamplonita

Martínez, 2000). Las series de caudales promedio anuales y de estiaje fueron ajustadas a FDP teóricas del tipo Y -tres parámetros. Este ajuste se realizó por optimización no lineal de residuales cuadráticos y bajo la verificación de hipótesis de concordancia, al 10% de significación, usando los criterios de Kolmogorov, Pearson y Smirnov (Tomás et al., 2002). De las FDP y CDP para los caudales promedio anuales y de estiaje se obtuvieron los caudales de ofertas modal y de año seco ($Q_0 = 5.60 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{97,5\%} = 2.60 \text{ m}^3/\text{s}$) y de estiaje del 97.5% de probabilidad de excedencia ($Q_{\min 97,5\%} = 0.90 \text{ m}^3/\text{s}$).

Posteriormente, y para calcular la oferta hídrica neta de cada municipio de la cuenca, se tomó el caudal modal (Q_0) y el del 97.5% de probabilidad de excedencia ($Q_{97,5\%}$) de la estación La Don Juana y se los transformó en lámina de escorrentía para luego ser convertidos en volúmenes de oferta municipal anual utilizando el área de jurisdicción de cada municipio. Esto permitió estimar los volúmenes de oferta total modal y del 97.5% de probabilidad de excedencia (oferta año extremo seco) para cada municipio.

De la CDP de caudales promedio anuales se obtuvo un coeficiente de variación de 0.38, lo que indica según la tabla 1 que $R_{it} = 0.35$, es decir que por irregularidad temporal $R_e = 0.16$, la oferta se debe reducir en un 35%. Por otra parte, aplicando la fórmula (4) se deduce que, es decir que para conservar el caudal de estiaje, la oferta se debe también reducir en un 16%. En total los dos factores aplicados

reducen la oferta hídrica superficial de todos estos municipios en un 51% $\{ (R_e + R_{it}) \times 100 \}$.

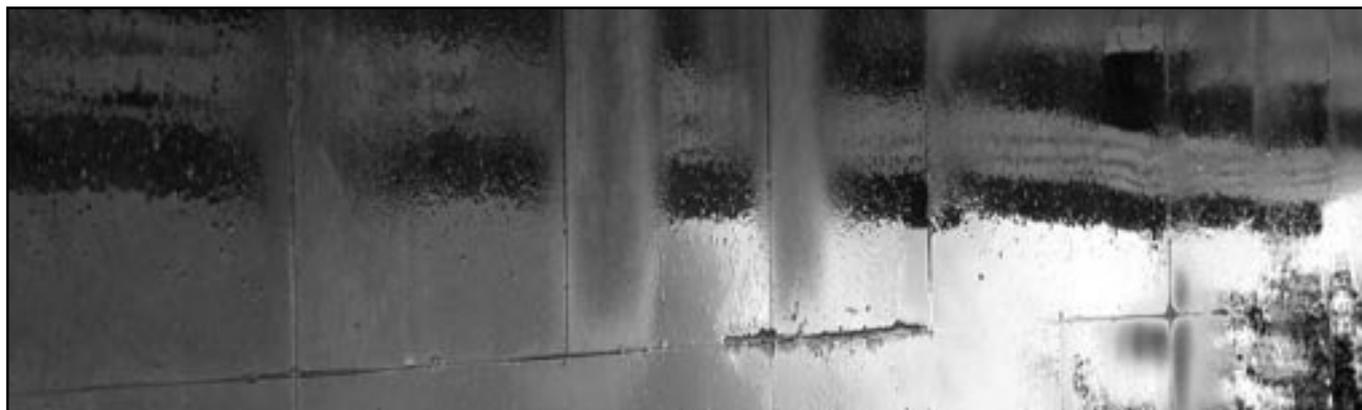
La información de demanda requerida por las ecuaciones (5) a la (10), para este caso concreto, fue obtenida de la siguiente forma:

Para el sector doméstico de acuerdo con el reglamento técnico de agua y saneamiento básico RAS -2000 (MAVDT, 2000) afectado en las variables de nivel de complejidad y por factores de pérdida por aducción y conducción hasta el usuario final.

En la segmento industrial se aplicaron los valores de volúmenes de producción de la encuesta anual manufacturera para los municipios de Los Patios y Cúcuta, incrementados por la tasa de crecimiento del PIB municipal. Los factores de consumo por tipo de producción se tomaron de *Water for Industrial, New York, USA 1963, Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible*.

Los módulos agrícola y pecuario se surtieron de información extraída de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y de encuestas realizadas por las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agrícola (UMATA) y por las Unidades Regionales de Planeación Agropecuaria (URPA). De los mencionados POT se obtuvo información con detalle local sobre el uso actual de suelos (escala 1:25000). Se siguió la metodología de la FAO (Estudio FAO No. 33, y National Research Council, 1998)

[11,12].



Finalmente, en el área de servicios fueron contemplados aeropuertos, hospitales y centros educativos.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la tabla 2 reflejan índices de escasez de año seco altos para Cúcuta, Bochalema, Chinácota, Pamplona y Pamplinita, y medio para Los Patios.

Esto no quiere decir que en las fuentes que abastecen a estos municipios las corrientes de agua estén secas, significa que la demanda representa una porción muy importante (más del 40%) de la oferta neta de un año hidrológicamente crítico como lo es el año seco (representado por el caudal anual promedio con probabilidad de excedencia del 97,5%).

Con la infraestructura existente en la actualidad para la gestión del agua, durante la aparición de fenómenos extremos como el fenómeno del Niño, en los municipios mencionados se podrían agudizar los conflictos por el agua entre los distintos usuarios ya que la región analizada sufre efectos deficitarios durante este evento. Esta situación se podría revertir con aplicación de medidas de gestión y administración del recurso como:

- a) Disminución de la irregularidad temporal de la oferta hídrica mediante cascadas de pequeños embalses (por ejemplo de 100 hectómetros cúbicos).
- b) Disminución de la demanda mediante el ahorro y uso eficiente del agua.
- c) Manejo integrado de fuentes superficiales y subterráneas.
- d) Disminución de pérdidas en los sistemas de captación y distribución del agua.

Las medidas mencionadas, junto con estrategias de protección de las fuentes abastecedoras, conducirían al aumento de la resiliencia de los asentamientos poblacionales y los sectores productivos. El índice de escasez en esta instancia, con antelación, está haciendo un llamado de atención para que los tomadores de decisiones inicien los procedimientos necesarios para disminuir la vulnerabilidad de los sistemas que administran.

CONCLUSIONES

A pesar de que Colombia cuenta con una oferta generosa de agua, este recurso no es infinito ni está distribuido homogéneamente en el territorio nacional. Por esta razón, la administración y gestión del recurso a escala nacional, regional y local debe tener en cuenta tendencias y escenarios futuros que permitan avanzar hacia un desarrollo sostenible. En este contexto, el índice de escasez es una herramienta que trae al presente consideraciones futuras para llamar la atención sobre la necesidad o no de tomar acciones hoy dirigidas a reducir el riesgo de desabastecimiento futuro.

Aunque este índice puede parecer muy exigente al generar alarmas a partir del momento en que la demanda alcanza el 20% de la oferta neta, es importante tener presente que se está usando los umbrales recomendados por el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO. Estos umbrales deben ser conservadores ya que deben tener en cuenta las deficiencias del indicador como: a) la dificultad de considerar adecuadamente todos los factores que reducen la oferta total al estimar la oferta neta (ej. la calidad del agua y las necesidades ecológicas por encima de los caudales mínimos históricos); y b) la incertidumbre asociada a la escala de la información disponible (pocas veces se tiene información primaria

a escala local forzando el uso de estimadores de la oferta y la demanda). Adicionalmente al incrementar la intensidad de uso del agua de las corrientes superficiales se provoca un aumento en las tasas de vertimientos de aguas negras o grises a las mismas y, por ende, de los niveles de presión por contaminantes. Esto obliga a tener umbrales críticos por demanda más conservadores con el fin de evitar reacciones tardías no sólo ante limitaciones en cantidad sino también por restricciones en calidad.

Por otra parte, como orientador de la gestión de hoy, es importante que estos indicadores enciendan alarmas cuando todavía hay tiempo suficiente para actuar racionalmente. El ejemplo analizado muestra que hay sitios en los que la situación es actualmente crítica a pesar de que hay disponibilidad hídrica en la región y de que el problema puede resolverse con gestión; sin embargo, esto tomará tiempo dada la magnitud de las medidas e inversiones necesarias. Estos sitios se hubieran beneficiado de contar con alertas tempranas, asumiendo que hubieran sido atendidas por los tomadores de decisión y por los usuarios.

Es importante anotar que las alarmas no solo deben ser atendidas por el sector ambiental. Aunque la protección y conservación de la cuenca habría contribuido a reducir el problema actual, el ejemplo muestra que el control de la demanda, el uso racional y la gestión de alternativas de abastecimiento son tan o más importantes que la gestión ambiental misma cuando se esta ante casos extremos. De manera que este índice debe ser atendido tanto por los usuarios, incluyendo al sector privado, como por el sector público en general y no solo por el sector ambiental.

Las acciones a emprender ante índices altos varían desde la protección de la cuenca abastecedora, el acceso a fuentes alternas de agua y el uso eficiente del recurso. Aunque estas medidas deben ser tomadas principalmente a escala local, también pueden tomarse medidas complementarias a escala nacional. A este respecto y como incentivo a nivel nacional para el uso eficiente del recurso, el Ministerio de

Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial recientemente incluyó el índice de escasez en el cálculo de la Tasa por Uso del Agua, haciendo que el agua sea más costosa en aquellos sitios en los que hay mayores índice de escasez.

BIBLIOGRAFÍA

Domínguez E., 2000.

Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos en Meteorología Colombiana, No 2. Bogotá.

Estudio FAO No. 33, citado por CLARO RIZZO, Francisco,

Ideam Bogotá, D.C. 1998

Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales, IDEAM. 2000.

Estudio Nacional del Agua. Bogotá.

IDEAM.

Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia,

Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá.

MAVDT,

Resolución 1096 de 2000: Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

Martínez, L.F. Y L.F. Ruíz, 1998.

Metodología para la estimación de datos faltantes en series temporales diarias,

Investigación desarrollada para el IDEAM, Subdirección de Hidrología.

Martínez, L.F. 2001.

Control Estadístico de Calidad, Información Hidrológica Nivel Mensual. Automatización SPSS y DEMETRA.

Investigación desarrollada para el IDEAM, Subdirección de Hidrología.

National Research Council. USA 1998.

Nieto, F.H. 1998.

Una Metodología para el Empleo del Paquete TRAMO, en el Análisis de Series Temporales cuya Longitud Excede el máximo Permitido,

Investigación desarrollada para el IDEAM, Contrato No. 037/98

OMM, 1997.

Evaluación general de los recursos de agua dulce del mundo,

Nueva York.

Tomás X., González L., Fernández L., Cuadros J., 2002.

Tablas Estadísticas,

Institut Statistic de Sarriá (IQS) – Departament d'Estadística Aplicada (DEA), Falcutat d'Economia.

UNESCO, 1979.

Balance hídrico mundial y recursos hidráulicos de la tierra

Estudios e informes sobre hidrología 25, Madrid.

UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme). 2003.

UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life.

Paris, New York and Oxford, UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) and Berghahn Books.

Water for Industrial, New York, USA 1963.

Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible.

Shiklomanov I.A., 1998.

World water resources a new appraisal and assessment for the 21st century. A summary of the monograph World Water Resources prepared in the framework of the International

Hydrological Program, UNESCO, Paris.

