

## RESOLUCIÓN 0865

22/07/2004

### DIARIO OFICIAL 45.630

por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones

La Ministra de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en ejercicio de las facultades legales, en especial las conferidas por el artículo 21 del Decreto 155 de 2004,

RESUELVE:

Artículo 1°. *Adopción de la metodología para el cálculo de Índice de Escasez para Aguas Superficiales, (IES).* Adoptar la metodología para el cálculo del Índice de Escasez para aguas superficiales desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ideam, adjunta a la presente resolución.

Parágrafo 1°. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, podrá adoptar otras metodologías alternas presentadas por la respectiva Autoridad Ambiental Competente para el cálculo del Índice de Escasez para aguas superficiales.

Parágrafo 2°. Las Autoridades Ambientales Competentes podrán utilizar los datos de Índice de Escasez por cabecera municipal calculados en el Estudio Nacional del Agua elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ideam, durante un término máximo de dos (2) años, contados a partir de la publicación de la presente resolución. Dentro de este plazo recolectarán la información para aplicar la metodología.

Artículo 2°. *Vigencia.* La presente resolución rige a partir de la fecha de su publicación.

Dada en Bogotá, D. C., a 22 de julio de 2004.

Publíquese y cúmplase.

La Ministra de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial,

*Sandra Suárez Pérez.*

#### METODOLOGIA DE CALCULO DEL INDICE DE ESCASEZ

##### CONTENIDO

1. INTRODUCCION
2. JUSTIFICACION DEL INDICE DE ESCASEZ
3. CALCULO DE LA OFERTA HIDRICA
  - 3.1 BALANCE HIDRICO
    - 3.1.1 Precipitación
      - a) Promedio Aritmético;
      - b) Polígonos de Thiessen;
      - c) Curvas Isoyetas.
    - 3.1.2 Evapotranspiración
      - a) Ecuación de TURC;
      - b) Ecuación de TURC modificada;
      - c) Otra expresión matemática.
    - 3.1.3 Escorrentía total
  - 3.2 CAUDAL MEDIO PUN TUAL
  - 3.3 RELACION LLUVIA  $\zeta$  ESCORRENTIA
    - 3.3.1 Número de Curva de Escorrentía, CN
    - 3.3.2 Clasificación hidrológica de los suelos
    - 3.3.3 Uso y tratamiento del suelo
    - 3.3.4 Condición hidrológica del suelo
    - 3.3.5 Condición de humedad antecedente
  - 3.4 CUANTIFICACION DE LA OFERTA NETA DISPONIBLE

- 3.4.1 Reducción por calidad del agua
- 3.4.2 Reducción por caudal ecológico
- 4. CALCULO DE LA DEMANDA HIDRICA
- 4.1 ESCENARIO: CUANDO EXISTE INFORMACION MEDIDA
- 4.2 ESCENARIO: CUANDO EXISTE INFORMACION MEDIDA, PERO ESTA ES INSUFICIENTE.
- 4.3 ESCENARIO: CUANDO NO EXISTE INFORMACION
- 5. ESTIMACION DEL INDICE DE ESCASEZ
- 5.1 FORMULA DEL INDICE DE ESCASEZ
- 5.2 UNIDAD DE MEDIDA DEL INDICADOR
- 5.3 CATEGORIAS E INTERPRETACIONES DEL INDICE DE ESCASEZ
- 6. LIMITACIONES DEL INDICE DE ESCASEZ
- 6.1 EN RELACION CON LA OFERTA
- 6.2 EN RELACION CON LA DEMANDA
- 6.3 DISPONIBILIDAD DE LOS DATOS
- 6.4 FUENTE DE DATOS
- 6.5 POSIBLES ENTIDADES RESPONSABLES DEL INDICE
- 7. CONCLUSIONES
- 8. RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA

## 1. Introducción

El presente trabajo recoge el conocimiento y el análisis metodológico para la obtención del índice de escasez, definiéndose este como la relación porcentual entre la demanda de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica disponible, luego de aplicar factores de reducción por calidad del agua y caudal ecológico.

Este Índice constituye la principal herramienta para evaluar si el recurso hídrico de un país, área hidrográfica, región, municipio o cabecera es suficiente o deficitario y aún más importante además, es agregar el ingrediente de calidad de agua al concepto de disponibilidad. De esta manera se encuentran nuevos soportes de planificación, desarrollo y uso racional y eficiente del agua.

Cuantificar la oferta hídrica a nivel de país, región o cuenca hidrográfica es esencial y aparentemente sencillo para iniciar el proceso de análisis, solamente requiere medir la lluvia y las fuentes que abastecen dichas áreas delimitadas, a partir de observaciones diarias en sitios estratégicos o de interés que pueden ser estaciones hidrológicas y meteorológicas, y así lograr obtener la variación sistemática de los principales parámetros considerados para su análisis, en el tiempo.

Una vez conocida la disponibilidad del agua como su calidad, especialmente para el consumo doméstico, entre otros usos tan importantes como el industrial, agrícola, pecuario, hidroenergético y aún actividades de recreación, se verifica si el agua es suficiente en espacio y tiempo o por el contrario no se garantiza una cantidad suficiente de este importante recurso para la comunidad. Lo cual traería como consecuencia actividades de almacenamiento en épocas de invierno que permitan suplir las necesidades en los períodos de sequía o estiaje.

Un suministro de agua a una comunidad para los diferentes usos que esta persigue, no indica que esta vaya a desaparecer en su totalidad, sino que una vez utilizada esta agua regrese nuevamente a la misma fuente o a otra, seguramente no en la misma cantidad pero si más contaminada por los desechos biológicos, lo cual implica que debe tratarse para que continúe el ciclo.

Como se observa, el complemento de la demanda es entonces la oferta, lo que en su conjunto se requiere para que una comunidad se desarrolle y se proyecte hacia el futuro. El poco conocimiento a cerca del índice de escasez puede considerarse en esta época demasiado delicada. Hay ejemplos de comunidades que no han tenido claro un concepto de proyección hacia el futuro en torno al agua, ni entendido el rol decisivo que juegan la demanda y la disponibilidad en términos de cantidad y calidad, hasta comprometer su equilibrio y llegar a agotar este importante recurso y viéndolo desaparecer completamente. Esta es una realidad que se observa en muchos de los municipios colombianos.

El Ideam continuará actualizando el presente documento y ajustando la metodología del cálculo del índice de escasez, en la medida que se obtenga la información requerida para ello.

## 2. Justificación del índice de escasez

El índice de escasez representa la demanda de agua que ejercen en su conjunto las actividades económicas y sociales para su uso y aprovechamiento frente a la oferta hídrica disponible (neta).

Esta relación calcula para condiciones hidrológicas medias y secas dando una visión general de la situación de la disponibilidad de agua actual y con las proyecciones futuras del abastecimiento a nivel nacional y regional de tal manera que las entidades del Estado involucradas en la gestión ambiental y de los recursos hídricos, tomen las medidas necesarias para que los planes de ordenamiento del uso de los recursos naturales y manejo sostenible de las cuencas hidrográficas, tengan en cuenta zonas que presentan índices de escasez con niveles preocupantes y otras características desfavorables. Inicialmente el índice de escasez se estimará anualmente y en la medida en que se obtenga la información mensual de oferta hídrica y demanda de las actividades socioeconómicas para cada sector, se estimará igualmente el índice de escasez en el nivel mensual.

## 3. Cálculo de la oferta hídrica

La oferta hídrica de una cuenca, es el volumen disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre. Al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma.

El conocimiento del caudal del río, su confiabilidad y extensión de la serie del registro histórico son variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial. Cuando existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio anual del río es la oferta hídrica de esa cuenca.

Para los efectos de calcular la oferta hídrica en una cuenca hidrográfica, se aplicará según cada caso las siguientes metodologías de acuerdo con la información disponible y características físicas de la cuenca:

a) Balance hídrico: Para cuencas hidrográficas con un registro de las variables climatológicas e hidrológicas mayor de 10 años, situación esta que permite estimar la oferta hídrica media anual. Esta metodología se aplica en cuencas instrumentadas y con un área de drenaje mayor (más de 250 km<sup>2</sup>);

b) Caudal medio puntual en las corrientes de interés: Cuando los registros de caudal generan series cortas y no confiables (series anuales menores de dos años);

c) Relación lluvia-escorrentía: Aplicable en cuencas menores, es decir cuyas áreas de drenaje sean inferiores a 250 km<sup>2</sup>, cuencas no instrumentadas y en consecuencia no cuentan con registros de caudal para la estimación de la oferta superficial mensual.

### 3.1 Balance hídrico

La estimación de la oferta hídrica para un espacio y periodo específico tiene como base el ciclo hidrológico modelado mediante el balance hídrico el cual determina la disponibilidad del agua en cada una de las fases: precipitación, evapotranspiración real, infiltración y escorrentía.

El balance hídrico es considerado un buen método para estimar con un margen de error pequeño el caudal medio anual en diferentes regiones de Colombia. Esta metodología se aplica en cuencas con áreas de drenaje mayores, instrumentadas y con información confiable.

La base física del balance hidrológico es la formulación de las ecuaciones de conservación de masa para volúmenes de control o unidades hidrográficas determinadas. Expresa la equivalencia entre los aportes de agua que entran al volumen de control y la cantidad de agua que sale considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado.

Para una cuenca se tiene:

Entradas (I):

¿ Precipitación (P)

¿ Escorrentía superficial desde otras cuencas

¿ Aguas subterráneas desde otras cuencas

Salidas (O)

¿ Evaporación

¿ Transpiración

¿ Escorrentía superficial hacia otras cuencas

¿ Agua subterránea hacia otras cuencas

¿ Infiltración

Cambio de almacenamiento ( $\Delta S$ ) ( $\Delta t$ )

- ¿ Almacenamiento de aguas subterráneas
- ¿ Almacenamiento por cambio de humedad del suelo
- ¿ Almacenamiento superficial en embalses canales y en la escorrentía superficial

El balance de agua en la atmósfera:

Donde:

- Q = Flujo neto de humedad en la atmósfera
- ETR = Evapotranspiración real
- P = Precipitación
- W = Almacenamiento de agua en la atmósfera

El balance en la columna de suelo es:

Donde:

- ETR=Evapotranspiración Real
- P=Precipitación
- Esc.=Escorrentía
- S=Almacenamiento de agua en el suelo

Al realizar un balance hídrico a largo plazo se tiene que los cambios en los volúmenes de agua almacenados en la atmósfera y los volúmenes de agua almacenados en el suelo, son despreciables. En consecuencia el flujo promedio en la atmósfera es igual al promedio de la escorrentía neta y son iguales a la diferencia entre la precipitación media y la evapotranspiración real.

Entonces se tiene para la columna de suelo:

$$\text{Esc. total} = P - \text{ETR} \quad (3.4)$$

La escorrentía está compuesta por la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea (flujo base). La dificultad de determinar la escorrentía subterránea obliga a aproximar en la ecuación 3.4 el término Esc. con la escorrentía superficial.

Es de anotar que la ecuación 3.4 presenta inexactitudes cuando se aplica en cuencas de gran área de drenaje y en suelos permeables donde la escorrentía subterránea es aun más importante que la escorrentía superficial.

Para el análisis de los parámetros antes mencionados, es necesario usar datos de registros históricos de estaciones hidrométricas y climatológicas representativas localizadas en las cuencas.

La oferta hídrica será calculada mediante la variable de escorrentía superficial de la ecuación (3.1). A continuación se presenta la forma de cálculo de la precipitación (P) y la evapotranspiración real (ETR).

### 3.1.1 Precipitación

Es importante para el balance hídrico la cuantificación de la lluvia para un intervalo de tiempo específico. A continuación se describirán los tres métodos generalmente más utilizados.

#### a) Promedio aritmético

El método aritmético da una buena estimación si los pluviométricos están uniformemente distribuidos en la cuenca, si el área de la cuenca es plana y la variación de las medidas entre los pluviómetros es pequeña o despreciable.

Donde:

- n = número de pluviómetros
- $P_i$  = precipitación registrada en el pluviómetro i (mm)
- P = precipitación media (mm);

#### b) Polígonos de Thiessen

Este método proporciona un promedio ponderado de los registros pluviométricos de las estaciones que tienen influencia sobre el área. Para asignar el grado de influencia o ponderación en un mapa de la cuenca se unen los puntos de las estaciones mediante líneas rectas a las cuales se le trazan las mediatrices formando polígonos. Los lados de los polígonos conforman el límite de las áreas de influencia de cada estación. La Figura 3.1 muestra los polígonos de Thiessen de acuerdo con la distribución de los pluviómetros en el mapa y la tabla 3.1 el cálculo de la precipitación media de la cuenca.

**Figura 3.1 Polígonos de Thiessen**

Donde:

n = Número de pluviómetros

P<sub>i</sub> = Precipitación registrada en el pluviómetro

A<sub>i</sub> = Área de influencia correspondiente al pluviómetro i, resultante del método de polígonos de Thiessen.

**Tabla 3.1 Cálculo de precipitación media - Polígonos de Thiessen**

**Estación Lluvia (mm) Área (km<sup>2</sup>) Lluvia ponderada (mm\*km<sup>2</sup>)**

P<sub>1</sub> est. 1100.222.2

P<sub>2</sub> est. 2204.0280.4

P<sub>3</sub> est. 3301.3540.5

P<sub>4</sub> est. 4401.6064.0

P<sub>5</sub> est. 5501.9597.5

9.14 284.6

$$\text{Precipitación media} = 284.6(\text{mm} \cdot \text{km}^2) / 9.14 (\text{km}^2) = 31.1 \text{ mm}$$

c) Curvas isoyetas

Es el método más preciso. Las isoyetas son líneas que unen puntos de igual precipitación; se trazan usando información de estaciones localizadas dentro y fuera de la cuenca, la metodología del trazado de estas curvas es similar a la usada para las curvas de nivel, pero aquí la altura de agua precipitada reemplaza la cota del terreno. La Figura 3.2 muestra las isoyetas en la cuenca hidrográfica.

**Figura 3.2 Curvas isoyetas**

Este método promedia la precipitación de dos isoyetas consecutivas y se le asigna un peso o ponderación proporcional a la sub-área entre las dos isoyetas.

Donde:

n = Número de curvas de igual precipitación

P<sub>i</sub> = Precipitación correspondiente a la curva de igual precipitación i

P<sub>i+1</sub> = Precipitación correspondiente a la curva de igual precipitación i+1

A<sub>i,i+1</sub> = Área entre las curvas de igual precipitación i e i+1

### 3.1.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. El volumen de agua que se ha evapotranspirado entra a formar parte de la humedad atmosférica como vapor, y representa una pérdida de agua en el balance hídrico de una cuenca.

Los factores que intervienen en la evapotranspiración son los mismos que afectan la evaporación a saber: el suministro de energía, el transporte de vapor y la humedad de la superficie.

La evapotranspiración potencial, es la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, por evaporación y por transpiración de las plantas, que ocurriría en caso de existir un adecuado abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento.

La evapotranspiración real es la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida en las condiciones atmosféricas y de humedad del suelo dominantes, por fenómenos de evaporación y transpiración.

Para un área determinada la evapotranspiración potencial es mayor a la evapotranspiración real siempre y cuando no se suministre agua a la superficie para reemplazar la que ya se evaporó. Es decir:

$$\text{ETR} = k \text{ETP} \quad (3.8)$$

Donde:

ERT = Evapotranspiración Real (mm)

K = Coeficiente que depende de la distribución temporal de las lluvias en el mes y de la capacidad del suelo para almacenar humedad. Su valor oscila entre 0.5 y 0.9.

ETP = Evapotranspiración Potencial (mm)

En la estimación de la evapotranspiración a pesar de existir varios métodos, en este documento, se cita algunos de orden práctico y de fácil aplicación, sobre todo en áreas con poca información climatológica y de usos del suelo, la cual es necesaria en la mayoría de los métodos para estimar la evapotranspiración (radiación, humedad relativa del suelo, horas de luz, tipo de vegetación, etc).

a) Ecuación de TURC

Como una ayuda para verificarla ETR en regiones con deficiencias de información se utiliza la fórmula de TURC. Esta ecuación calcula directamente la evapotranspiración real teniendo en cuenta la temperatura y la precipitación. Este es un método de cálculo aproximado y además de fácil aplicación, puesto que no requiere variables difíciles de medir, cuya expresión es la siguiente:

En donde:

ETR = Evapotranspiración Real media anual (mm)

P = Precipitación media anual (mm)

L(t) = Parámetro heliotérmico expresado así:  $300 + 25t + 0.05 t^2$

T = Temperatura media anual (°C)

Para obtener los valores de precipitación y temperatura de una forma densa en todo un territorio, se superpone sobre el mapa de isoyetas el correspondiente de isotermas y los cruces de estas dos isolíneas serán los datos para obtener la ETR en ese punto. Identificados así todos los cruces se elaborarán las isolíneas de ETR mediante la ecuación de TURC.

Esta fórmula presenta diferencias hasta el 15% en relación con el valor resultante de la diferencia entre la precipitación media y la escorrentía media ( $ETR = P - Esc. Total$ ), parámetros ya considerados de buena confiabilidad.

b) Ecuación de TURC modificada

Por intermedio de la ecuación de TURC modificada se calcula la evapotranspiración potencial, cuya expresión está en función de la temperatura, radiación, humedad relativa y una constante que depende del mes o período considerado.

Para una humedad relativa media mensual superior al 50% se aplica la ecuación:

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial expresada en mm/mes.

K = es la constante igual a 0.4 para meses de 30 o 31 días y 0.37 para el mes de febrero y 0.13 para períodos de diez días.

T = temperatura media mensual en grados centígrados.

Rg = radiación solar global incidente del mes considerado expresada en cal/cm<sup>2</sup>/día.

c) Otras expresiones matemáticas

Cuando por determinadas características de una región o cuenca hidrográfica no se ajusten las anteriores expresiones matemáticas para el cálculo de la evapotranspiración tanto real como potencial, estas deberán obtenerse por medio de otras expresiones ajustadas en dichas regiones o cuencas hidrográficas.

3.1.3 Escorrentía total

La escorrentía total está representada por los flujos superficial y subterráneo, estos son medidos en las estaciones hidrométricas que conforman una red hidrológica y que por tal circunstancia es conjuntamente con la precipitación los parámetros medidos directamente y con mayor precisión.

De tal forma la escorrentía superficial es el agua que escurre hacia la corriente de drenaje de la cuenca después que la precipitación se ha repartido en intercepción, retención e infiltración. El estado inicial de humedad de la cuenca regula las magnitudes relativas intercepción, retención e infiltración.

El cálculo de la escorrentía se hace con la ecuación (3.4), método recomendado por la Unesco<sup>1</sup>, que a partir de los parámetros observados directamente como la precipitación y la escorrentía que mediante la aplicación de la ecuación simple de balance hídrico simplificado se obtienen los valores medios de ETR para las cuencas hidrográficas o regiones de interés.

$$Esc = P - ETR$$

Donde:

Esc. = Escorrentía media (mm)

P = precipitación media multianual (mm)

ETR = evapotranspiración Real media multianual (mm)

### 3.2 Caudal medio puntual

Para conocer el caudal disponible de utilización en un corriente, es necesario conocer con que frecuencia ocurren caudales iguales o superiores de un valor determinado (caudal medio).

La caracterización de la corriente implica conocer los caudales máximos, mínimos y medios registrados en la estación Limnimétrica. El caudal medio se define como:

Donde:

Q = Es el caudal medio (m<sup>3</sup>/s)

Q<sub>i</sub> = Caudal medido en el período de estudio

n = Número total de datos de caudal (suficientemente grande)

Los datos de caudal se pueden agrupar en intervalos menores que la amplitud total Q<sub>max</sub>-Q<sub>min</sub> obteniendo una serie de n valores que permite un manejo más racional de la información. Si se ordena la serie de menor a mayor sin tener en cuenta el orden cronológico de los valores, se obtiene la frecuencia absoluta (f) de los valores comprendidos en cada intervalo.

La curva de duración de caudales medios diarios que se muestra en seguida, permite observar la variabilidad de dichos caudales en el tiempo, con lo cual se puede tener un mejor conocimiento en el manejo de la disponibilidad del agua y explicar igualmente la relación demanda-oferta, sobre un presupuesto de decisión para almacenar un determinado volumen de agua que podría ser aprovechado en las épocas de estiaje.

La tabla 3.2 para el ingreso de los datos se construye de la siguiente manera:

**Tabla 3.2 Distribución de frecuencias**

Intervalo de clases	Frecuencia parcial	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada (%)
(m <sup>3</sup> /s)	N	N	%

....  
....  
....  
....  
....  
....  
....

Una vez construida la tabla de ingreso de los datos de la tabla anterior, se procede a elaborar la curva de duración de caudales medios, como se muestra en la siguiente figura 3.3

Para calcular el índice de variabilidad se leen en la curva construida los caudales a diferentes porcentajes y para adelantar el análisis se construye la tabla 3.3 para ingresar los valores.

**Tabla 3.3 Cálculo del Índice de variabilidad (IV)**

Para calificar el estado de la cuenca y la variabilidad de los caudales disponibles, se extrae la raíz cuadrada de W y se obtiene de esta manera el índice de variabilidad, I.V. =  $\sqrt{W}$ .

### 3.3 Relación lluvia y Escorrentía

El Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service, SCS), desarrolló un método para el cálculo de las abstracciones iniciales de una tormenta, las cuales incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración denominada número de curva de escorrentía.

La escorrentía es función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía o CN. Este método es aplicable para cuencas menores a 250 km<sup>2</sup> y se puede aplicar para conocer la escorrentía mensual y generar mapas de isolinéas de escorrentía como ayuda para el cálculo de la oferta hídrica superficial.

#### 3.3.1 Número de curva de escorrentía CN

El número de curva de escorrentía CN del Soil Conservation Service, SCS, fue desarrollado como un índice que representa la combinación de los grupos hidrológicos del suelo, el uso y la clase de tratamiento de la tierra. Análisis empíricos condujeron a deducir que el CN es función de tres factores: Clase de suelo, la cobertura y las condiciones de humedad antecedente (5 días).

#### 3.3.2 Clasificación hidrológica de los suelos

El SCS clasificó hidrológicamente más de 4.000 suelos basándose en su potencial de escurrimiento para lo cual los agrupó en cuatro grupos de suelos hidrológicos, los cuales se identifican con las letras A, B, C y D.

**Suelo tipo A:** Potencial de escurrimiento bajo. Suelos con altas capacidades de infiltración cuando están completamente húmedos, principalmente arenas y gravas muy bien ordenadas. Suelos con alta transmisión de agua.

**Suelo tipo B:** Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión de agua.

**Suelo tipo C:** Suelos con capacidades de infiltración baja cuando están completamente húmedos, principalmente suelos que contienen una capa que impide el movimiento hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Estos suelos tienen baja transmisión de agua.

**Suelos tipo D:** Suelos con capacidades de infiltración muy baja cuando están completamente húmedos. Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Suelos con transmisión del agua muy baja.

En la siguiente Tabla 3.4, se estima el valor del número de curva (CN) de acuerdo con la clasificación hidrológica de los suelos.

### 3.3.3 Uso y tratamiento del suelo

La condición superficial en la cuenca hidrográfica se refleja en el uso del suelo y las clases de tratamiento. El uso del suelo está asociado a las coberturas forestales y vegetales de la cuenca como son el tipo de vegetación, los usos agrícolas, tierras en descanso, superficies impermeables y áreas urbanas. El tratamiento del suelo se aplica a las prácticas mecánicas como perfilado de curvas de nivel propias del uso agrícola, y prácticas de manejo como controles de pastoreo y rotación de cultivos.

En suelos cultivados se identifican: tierras en descanso, praderas, cultivos de hilera, cultivos de granos, rotaciones (pobre, aceptable, buena), cultivos en hileras rectas, vegetales sembrados cercanamente, campos sembrados a lo largo de la curva de nivel y cultivos en terrazas.

### 3.3.4 Condición hidrológica del Suelo

El tipo de vegetación y la densidad de la cobertura en la cuenca tienen una gran influencia en la capacidad de infiltración del suelo. Se definieron las siguientes categorías de cobertura para pasto natural. El porcentaje se estima cualitativamente en los planos respectivos:

Pobre = Menos del 50% de área cubierta por pasto. Alta intensidad de pastoreo.

Aceptable = 50 al 75% del área cubierta por pasto. Intensidad media de pastoreo.

Buena = 75% del área cubierta por pasto. Intensidad ligera de pastoreo.

La condición hidrológica para los bosques se determina igualmente cualitativamente como:

Pobre = bosques regularmente quemados con pocos arbustos y poco humus vegetal.

Aceptable = con algunos arbustos, moderada cantidad de humus vegetal y pasto.

Buena = Protegido con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie.

### 3.3.5 Condición de humedad antecedente

La humedad antecedente tiene en cuenta la precipitación de los cinco días previos a la tormenta. La condición de humedad antecedente seca (AMCI) tiene el menor potencial de escorrentía con los suelos secos satisfactorio para cultivos. La condición de humedad antecedente promedio (AMCII) tiene un potencial de escorrentía medio. La condición de humedad antecedente humedad (AMCIII) tiene el mayor potencial de escorrentía, con la cuenca prácticamente saturada por precipitaciones anteriores, como se muestra en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente**

### 3.4 Cuantificación de la oferta hídrica neta disponible

Para obtener la oferta hídrica neta disponible, se procede a reducir la oferta hídrica total calculada mediante los métodos explicados en el punto 3, es decir reducir la oferta hídrica total por calidad del agua y por caudal mínimo ecológico.

#### 3.4.1 Reducción por calidad del agua

La calidad del agua es factor que limita la disponibilidad del recurso hídrico y restringe en un amplio rango de posibles usos. La mayoría de los ríos colombianos reciben y acarrean cargas de agua utilizada para los diferentes procesos de la actividad socioeconómica y son vertidos en gran porcentaje sin tratamiento previo, además son los

receptores de altos volúmenes de sedimentos, originados por procesos de erosión sea esta de origen natural o derivada de la acción antrópica.

Generalmente la alteración a la calidad del agua tiene que ver con la contaminación por materia orgánica, por nutrientes y por una gran variedad de sustancias químicas y sintéticas de naturaleza tóxica. Como fuentes principales de contaminación de las aguas superficiales se destacan:

- d) Las aguas residuales domésticas e industriales;
- e) El escurrimiento de aguas en zonas de producción agrícola y ganadera;
- f) Las aguas lluvias por arrastre de compuestos presentes en la atmósfera, y
- g) Las aguas procedentes de los procesos de extracción minera.

La acción de cualesquiera de las anteriores causas puede ser expresada parcialmente por el contenido de oxígeno en los ríos. Este indicador da una visión sintética de la carga de contaminantes y de los esfuerzos necesarios para recuperar la calidad del agua.

La contaminación en términos de aumento de carga sólida en el agua por descarga de sedimentos se manifiesta con mayor frecuencia en las corrientes de régimen torrencial y depende en esencia de la intensidad de la lluvia en la parte alta de las cuencas, que interactúa con el sistema de cobertura vegetal y suelo en dichas cuencas. Esta alteración está también directamente relacionada con las actividades antrópicas.

Mediante el monitoreo sistemático de indicadores de calidad del agua como los anteriores se debe avanzar en el conocimiento de los niveles de calidad ambiental de los recursos hídricos mencionados.

Para estimar el grado de presión o afectación sobre la calidad de los recursos hídricos se deben realizar estimaciones de la demanda biológica de oxígeno (DBO expresada en toneladas por año) generada por el vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales, así como las derivadas del beneficio del café. Esta presión afecta la calidad y disponibilidad de los cuerpos de agua receptores en las áreas situadas aguas abajo de los puntos de vertimiento.

Una vez se conozca el estado de la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento como de los cuerpos de agua, la oferta hídrica de estos sistemas se debe afectar por el 25%, correspondiendo a la condición de calidad del agua.

#### **3.4.2 Reducción por caudal ecológico**

El caudal mínimo, ecológico o caudal mínimo remanente es el caudal requerido para el sostenimiento del ecosistema, la flora y la fauna de una corriente de agua. Existen diversas metodologías para conocer los caudales ecológicos:

¿ Hidrológicas. Se basan en el comportamiento de los caudales en los sitios de interés, para lo cual es necesario el conocimiento de series históricas de caudales.

¿ Hidráulicas. Consideran la conservación del funcionamiento o dinámica del ecosistema fluvial a lo largo de la distribución longitudinal del río, es decir que el caudal de reserva que se deje en los distintos tramos permita que el río siga comportándose como tal.

¿ Simulación de los hábitats. Estiman el caudal necesario para la supervivencia de una especie en cierto estado de desarrollo.

Mínimo histórico: El Estudio Nacional del Agua (2000) a partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 a máximo 10 años que permanece el 97.5% del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años.

Porcentaje de Descuento: El IDEAM ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

La autoridad ambiental debe escoger entre las anteriores metodologías de acuerdo con la información disponible y las características regionales particulares.

Finalmente la suma de la reducción por calidad del agua (25%) más la reducción por caudal ecológico (25%), equivale a la reducción total de la oferta hídrica calculada en el punto 3, para regiones Andina y Caribe.

#### **4. Cálculo de la demanda hídrica**

El país no cuenta con un sistema de información continua y sectorial de uso del agua, ni ha contabilizado históricamente el agua usada de fuentes superficiales y subterráneas. El volumen de agua usada para el desarrollo de actividades socioeconómicas, debe ser el resultado de las mediciones efectuadas por los usuarios y reportadas a las instituciones relacionadas y autoridades ambientales regionales. En este documento se presentan tres escenarios:

#### 4.1 Escenario: cuando existe información medida

La demanda de agua en general, representa el volumen de agua, expresado en millones de metros cúbicos, utilizado por las actividades socioeconómicas en un espacio y tiempo determinado y corresponde a la sumatoria de las demandas sectoriales.

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP \quad (3.16)$$

Donde:

DT = Demanda Total de agua

DUD = Demanda de Agua para Uso Doméstico

DUI = Demanda de Agua para uso Industrial.

DUS = Demanda de Agua para el Sector Servicios.

Se realiza la sumatoria de cada una de las demandas por sectores, expresada en millones de metros cúbicos.

#### 4.2 Escenario: Cuando existe información medida, pero esta es insuficiente

Frente a esta situación se debe aprovechar la información medida, que debe ser agrupada y catalogada en unidades expresadas en millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) en una base de datos. Por otra parte la información inexistente debe complementarse utilizando la metodología expuesta en el Punto 4.3.

#### 4.3 Escenario: Cuando no existe información

En este escenario se debe estimar potencialmente el volumen de agua demandada en millones de metros cúbicos a nivel sectorial. Estas estimaciones se basan principalmente en la asociación de dos variables: el volumen de producción sectorial y un factor de consumo de agua por tipo de bien, con el limitante de que estas estimaciones no contemplan las pérdidas de los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución del agua en el suministro de agua potable y a nivel de la industria, tampoco tienen en consideración el nivel tecnológico, los métodos de producción limpia y el uso que del agua hace la industria extractiva.

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP$$

Donde:

DT = Demanda Total de agua

DUD = Demanda de Agua para Uso Doméstico

DUI = Demanda de Agua para uso Industrial.

DUS = Demanda de Agua para el Sector Servicios.

DUD = Demanda de Agua para Uso Doméstico, es la cantidad de agua consumida por la población urbana y rural para suplir sus necesidades. El cálculo de la demanda de agua para consumo humano se realiza utilizando la siguiente expresión:

$DUD = \text{Demanda per cápita urbana} * \text{número de habitantes urbanos} + \text{Demanda per cápita rural} * \text{número de habitantes rurales.}$

DUI = Demanda de Agua para uso Industrial. Es la cantidad de agua consumida por los diferentes sectores de la industria manufacturera y extractiva, véase Anexo 1. El cálculo de la demanda para uso industrial se realiza utilizando la siguiente expresión:

Donde:

DUI: Demanda de agua para uso industrial

V<sub>pi</sub>: Volumen de producción según sector económico

F<sub>ci</sub>: Factor de consumo según sector económico

DUS = Demanda de Agua para el Sector Servicios, es la cantidad de agua consumida por el sector servicios que incluye entre otros: comercio, transporte y almacenamiento, comunicaciones, bancos, seguros y servicios a empresas, alquileres de vivienda, servicios personales y servicios del gobierno.

El cálculo de la demanda para el sector servicios se realiza utilizando la siguiente expresión:

Donde:

DUS: Demanda de agua para el sector servicios

N<sub>i</sub>: Número de establecimientos por tipo de servicio

F<sub>cs</sub>: Factor de consumo por tipo de servicio

DUA = Demanda de Agua para Uso Agrícola, la principal fuente de agua para la agricultura es la precipitación, los volúmenes adicionales necesarios para el desarrollo de cultivos, deben ser previstos por sistemas de riego.

Cuando la precipitación es menor que el uso consuntivo de uncultivo ( $ETP \cdot kc$ ) el agua debe ser suministrada a través de sistemas de riego.

Con el uso de sistema de información SIG, se asocian los datos fisiográficos del área de estudio sobre cultivos, precipitación y evapotranspiración. A estos valores se adiciona el coeficiente de uso de agua por tipo de cultivo obtenido teóricamente del informe de la FAO 33, véase anexo 2. Una vez construida una tabla de valores de variables asociadas, se estima la demanda de agua a partir de la expresión:

Donde:

DUA: Demanda de agua para el sector agrícola

$P$  : Precipitación

$ETP$ : Evapotranspiración potencial

$kc$  : Coeficiente de uso de agua del cultivo (FAO 33)

$ha$  : Número de hectáreas cultivadas

DUP: Demanda de agua para uso pecuario: Es el resultado de multiplicar el volumen de producción de animales de importancia comercial, por un factor de consumo promedio aproximado, el cual está determinado teniendo en cuenta el tipo de animal, el tipo de producción y el consumo de materia seca y alimento requerido. Como tipo de animales de importancia comercial se clasifican: bovinos carne, leche y doble propósito, aves de corral y porcinos. Los factores de consumo para la producción pecuaria se encuentran en el Anexo 3.

Donde:

DUP: Demanda de agua para uso pecuario

$V_{pai}$ : Volumen de producción por tipo de animal industrial

$F_{ca}$ : Factor de consumo según de producción animal

### 5. Estimación del índice de escasez

Una vez realizadas las respectivas mediciones, cálculos y análisis con respecto a la oferta hídrica neta y a la demanda, se calcula el índice de escasez a partir de la expresión matemática (2.20) estableciéndose de esta manera una relación porcentual.

#### 5.1 Fórmula del índice de escasez

Donde:

$I_e$  : Índice de escasez en porcentaje

$D_h$  : Demanda hídrica en metros cúbicos ( $m^3$ )

$O_h$  : Oferta hídrica superficial neta en metros cúbicos ( $m^3$ )

$F_r$  : Factor de reducción por calidad del agua y el caudal ecológico

100 : Para expresarlo en porcentaje

#### 5.2 Unidad de medida del indicador

La unidad de medida del índice de escasez es el porcentaje (%)

#### 5.3 Categorías e interpretación del índice de escasez

Si bien el índice de escasez da cuenta de los niveles de abundancia o escasez, relacionando la oferta específica con la demanda correspondiente, debe tenerse en cuenta que el abastecimiento de agua para los diferentes usos involucra aspectos como el almacenamiento y transporte del recurso hídrico. Por ello, no necesariamente los altos niveles de escasez en áreas específicas coinciden con problemas graves de abastecimiento de los sistemas, para los cuales se han desarrollado infraestructuras de manejo particulares.

El índice de escasez se agrupa en cinco categorías:

#### Categoría Rango Color Explicación

Alto >50% Rojo Demanda alta

Medio alto 21-50% Naranja Demanda apreciable

Medio 11-20% Amarillo Demanda baja

Mínimo 1-10% Verde Demanda muy baja

No significativo <1% Azul Demanda no significativa

Para evaluar la relación que existe entre la oferta hídrica disponible y las condiciones de demanda predominantes en una unidad de análisis seleccionada, se deberá considerar la clasificación citada por Naciones Unidas en la cual se expresa la relación entre aprovechamientos hídricos como un porcentaje de disponibilidad de agua. En esta

relación cuando los aprovechamientos representan más de la mitad de la oferta disponible se alcanza la condición más crítica.

## **6. Limitación del índice de escasez**

### **6.1 En relación con la oferta**

¿ El factor de reducción de la oferta está dado de forma global al no disponerse de resultados sobre los factores de reducciones específicos para cada sector usuario y para cada región.

¿ Para estimar la oferta hídrica subterránea municipal se utilizan los datos generales de los estudios regionales. La cuantificación se realiza a partir de cuencas hidrogeológicas regionales limitadas por estructuras geológicas que abarcan varios municipios; por tal razón la estimación está definida por la geometría y las propiedades hidráulicas de los grandes sistemas acuíferos. En este nivel la oferta es compartida por los municipios cuya jurisdicción está en el área de los sistemas acuíferos principales, pues no hay estudios detallados sobre la distribución y dinámica de las unidades locales de captación, ni sobre la extensión y propiedades de las subcuencas hidroestratigráficas.

¿ Es necesario detallar los modelos hidrogeológicos conceptuales para que representen las condiciones locales de los sitios de captación.

¿ Se requiere de la implementación de una red de monitoreo que permita conocer la variación de la oferta en el tiempo, entendida esta como la recarga a los acuíferos, a partir de las fluctuaciones de los niveles estáticos en estos puntos de observación.

### **6.2 En relación con la demanda**

La demanda de agua para uso doméstico, se realizó sobre una estimación basada en información arrojada por el análisis de consumos de una muestra de solamente 49 municipios.

Se asume un tamaño promedio de cinco habitantes por hogar a nivel nacional, una estimación más precisa requiere por lo menos el tamaño promedio para cada una de las cabeceras municipales.

Se hizo un promedio aritmético del consumo por estrato, sin ponderarlo teniendo en cuenta la población de cada uno de los estratos.

Las estimaciones no contemplan las pérdidas de los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución.

Los factores de consumo de agua en la industria por tipo de actividad económica, son teóricos y tomados de fuentes secundarias.

Los factores teóricos para consumo de agua no contemplan la tecnología utilizada en los diferentes sectores.

Las estimaciones de demanda de agua en la industria no contemplan los usos de este recurso en la industria extractiva.

El indicador no tiene en cuenta la demanda de agua para la generación eléctrica por medio de hidroeléctricas.

Para actualizar la información del sector pecuario al año 1999, se utilizaron tasas de crecimiento real sectorial.

El censo ganadero no reporta valores para los departamentos de Tolima, Chocó y Vaupés.

En todos los cálculos donde se usan factores reportados por la bibliografía, es necesario ir ajustándolos a medida que se va obteniendo información real para el país, sobre dichos consumos.

Para el cálculo de la demanda no se tiene en cuenta la demanda fisiológica de los cultivos de secano.

### **6.3 Disponibilidad de los datos**

#### **6.4 Fuente de datos**

##### **6.4.1 Oferta hídrica:**

Ideam, Corporaciones Autónomas Regionales, Corporaciones de Desarrollo Sostenible, Autoridades Ambientales de Grandes Centros Urbanos y otras entidades que operen redes ambientales.

##### **6.4.2 Demanda hídrica:**

Corporaciones Autónomas Regionales, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Empresas públicas, Sectores productivos, Incoder y DANE.

### **6.5 Posibles entidades responsables del índice**

Ideam, Corporaciones Autónomas Regionales, Unidades Ambientales de las grandes ciudades.

## **7. Conclusiones**

La garantía del índice de escasez está en función de la información disponible, es decir cuando existen variables

medidas directamente (oferta y demanda) se reduce el porcentaje de error del índice.

#### **8. Recomendaciones**

Fortalecer los programas de medición de las fuentes de abastecimiento actuales, estableciendo las prioridades a que haya lugar en aquellas fuentes sometidas a una alta presión en términos de cantidad y calidad.

Realizar los inventarios de las fuentes de abastecimiento municipal y en cabeceras por los principales sectores usuarios: Doméstico, Servicios, Industrial, Agrícola, Pecuario, Hidroenergético y Recreacional.

Realizar los inventarios de las nuevas fuentes de abastecimiento identificadas para los diferentes usos e involucrarlas en los programas de medición, máxime si están en los programas de abastecimiento suplementario.

#### **BIBLIOGRAFIA**

1. Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. Hidrología aplicada, McGraw-Hill, Bogotá 1994.
2. INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, Ideam. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, 2000.
3. INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Primera Generación de Indicadores de la Línea Base de la Información Ambiental de Colombia. Trade Link Ltda. Bogotá, 2000.
4. INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Perfil ambiental de Colombia. Trade Link Ltda. Bogotá, 2000.
5. MAVDT - Grupo de Análisis Económico. Metodología para el cálculo del índice de escasez. Documento preliminar, Bogotá, D.C., 2004.
6. Monsalve, S.G. Hidrología en la ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 1995.
7. Unesco. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Montevideo-Uruguay, 1982.
8. CIDIAT. Hidrología de tierras agrícolas. Mérida-Venezuela, 1984.

#### **ANEXO 1. INDUSTRIA**

#### **ANEXO 3. ANIMALES**

Consumo aproximado de agua diaria en bovinos  
Valores en litros día

#### **ANEXO 4. ANIMALES**

Consumo de agua a voluntad en aves de corral  
Valores en litros por cada 100 aves

#### **ANEXO 3. ANIMALES**

Consumo aproximado de agua en  
Valores en litros/día por

**(C.F.)**