

**Autores:**

Martha García (Hidrología y Recursos hídricos)  
Félix Darío Sánchez (Hidrología)<sup>1</sup>  
Rodrigo Marín (Hidrología)<sup>2</sup>  
Héctor Guzmán (Hidrología)<sup>3</sup>  
Nelsy Verdugo (Recursos hídricos)  
Efraín Domínguez (Ecología hidrometeorológica)<sup>4</sup>  
Omar Vargas (Geología)  
Lorenzo Panizzo (Físico-química ambiental)<sup>5</sup>  
Nancy Sánchez (Físico-química ambiental)  
Jeremías Gómez (Físico-química ambiental)  
Guillermo Cortés (Físico-química ambiental)

**4**

---

## El agua

---

- 
- <sup>1</sup> Profesor, facultad de Ingeniería Recursos Hídricos. Universidad Central
  - <sup>2</sup> Profesor, facultad de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia
  - <sup>3</sup> Profesor Postgrado Planeación Ambiental, Universidad Militar Nueva Granada
  - <sup>4</sup> Profesor, facultad de Ingeniería Recursos Hídricos. Universidad Central
  - <sup>5</sup> Profesor, facultad de Ingeniería Recursos Hídricos, Universidad Central  
Profesor, Instituto de Estudios Ambientales, IDEA. Universidad Nacional de Colombia

**Con la colaboración de:**

Guillermo Rodríguez, Martha de Flórez, Álvaro Moreno, Guillermo Olaya, Hernando Wilches, Óscar Martínez, Bernardo Méndez, Claudia Contreras, Patricia León, Ivonne Jaramillo, Mauricio Bermúdez, Raúl Niño, Carlos Eduardo Martínez, Blanca Ruth Moreno, Stella Gaitán, Ana María Hernández y Carlos M. Páez

**E**l agua es un compuesto con características únicas, de gran significación para la vida, el más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural.

El agua, al igual que el fuego, la tierra y el aire, fue para los griegos uno de los cuatro elementos que formaron el mundo. El griego Tales de Mileto creía que el agua era el principio de todas las cosas existentes. Más tarde Empédocles, seguido por Platón y Aristóteles, la consideró como uno de los cuatro elementos básicos del universo, y luego, a fines del siglo XVIII, nadie puso en duda que el agua fuera un elemento simple. En 1775 el químico francés Macquer obtuvo algunas gotas de agua por combustión del hidrógeno; pese a ello, tres años después escribió que el agua parecía ser “una sustancia inalterable e indestructible” que no podía ser descompuesta; tal era la tenacidad con que se mantenían las ideas de Platón y Aristóteles.

Pero una serie de experiencias químicas demolerían las viejas nociones. El primero fue el físico y químico inglés Henry Cavendish, quien en 1781 al estudiar los gases demostró que el agua es el resultado de una combinación del hidrógeno –llamado ‘aire inflamable’– con el oxígeno de la atmósfera –llamado ‘aire vital’–.

Grandes científicos como Monge, Priestley y Watt contribuyeron al descubrimiento de la composición del agua. Pero es al químico francés Lavoisier, asistido por el futuro astrónomo Laplace, a quien corresponde el mérito de haber comprendido y explicado la verdad: el 24 de junio de 1783, logró una verdadera síntesis del agua a partir de oxígeno e hidrógeno, demostrando que es un compuesto de esos elementos; poco tiempo después realizó la experiencia inversa de la descomposición del agua. Lavoisier fue, por lo demás, quien dio sus nombres actuales al oxígeno y al hidrógeno (este último quiere decir ‘productor de agua’).

Hoy día se sabe que la molécula de agua resulta de la combinación de un átomo de oxígeno con dos de hidrógeno: molécula aparentemente simple, pero cuyas propiedades extraordinarias constituyen el fundamento mismo de la vida terrestre.

El agua aparentemente se resume en una simple fórmula:  $\text{H}_2\text{O}$ , que es la característica más general de las grandes masas que cubren el 71% de la superficie de la tierra (océanos, casquetes polares, glaciares, aguas superficiales y subterráneas) y que conforman lo que se denomina la hidrosfera. Según algunos autores –en particular, oceanógrafos– esta gran masa de agua distribuida uniformemente en la superficie de la tierra formaría una capa de 4 km de espesor (Losiev, 1989).

Aunque la física moderna representa en forma compleja los átomos por medio de modelos orbitales, cabe

hacer una representación geométrica simple de la molécula del agua; de acuerdo con ella, puede decirse que el átomo de oxígeno tiene seis electrones en su órbita exterior, la cual, para ser estable, debería tener ocho. Por su parte, cada átomo de hidrógeno tiene un electrón en su órbita, que, para ser estable, debería tener dos. De esta manera, dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno ‘asocian’ sus electrones exteriores para dar la configuración de la molécula de agua.

Esta asociación no se hace de cualquier manera: los dos átomos de hidrógeno interaccionan a los lados del átomo de oxígeno, de ello se derivan dos consecuencias de gran importancia.

En primer lugar, la extremada estabilidad de la molécula de agua a causa de que en el enlace entre el oxígeno y el hidrógeno se origina una asociación de electrones –enlace llamado de covalencia–; por esta razón es muy difícil disociar dicha molécula, lo que le permite existir en condiciones extremas y en diferentes lugares del universo.

En segundo lugar, la asimetría de la molécula de agua: a un lado, su componente de oxígeno, de carga negativa, y, al otro, su componente de hidrógeno, de carga positiva. De ahí que la molécula actúe como un pequeño imán. Las interacciones eléctricas entre el hidrógeno de una molécula y los pares de electrones relativamente ‘libres’ del oxígeno de otra, dan lugar a un enlace molecular llamado ‘enlace de hidrógeno’. Gracias a la presencia de estos enlaces, cada molécula de agua tiene una tendencia a asociarse con otras cuatro.

Un análisis de la hidrosfera nos muestra que ésta es una mezcla de diferentes tipos de agua con la fórmula común  $\text{H}_2\text{O}$ . Estos distintos tipos de agua se conforman por la unión de isótopos de oxígeno e hidrógeno. En el caso del oxígeno existen, además del  $\text{O}^{16}$ , isótopos pesados,  $\text{O}^{17}$  y  $\text{O}^{18}$ , que pueden combinarse con el hidrógeno común de masa 1 o con otros más pesados, como el deuterio (D) y el tritio (T), con masa 2 y 3, respectivamente. De este modo se pueden formar teóricamente 42 tipos isotópicos de agua, de los cuales sólo siete son estables (no radiactivos). Hay que advertir que estas especies químicas, deuteradas o tritiadas, se encuentran en concentraciones muy bajas, sólo detectables con instrumentos sensibles.

Con la variación de la temperatura se modifica la estructura del agua: así, a 0 °C está constituida básicamente por cadenas poliméricas  $(\text{H}_2\text{O})_n$ ; en cambio, a una temperatura de 4 °C, la mayor parte de la masa de agua se conforma de conglomerados cristalinos (Horne, 1982).

Algo que caracteriza al agua son sus anomalías en los puntos de ebullición y congelación. Al analizar compuestos químicos semejantes a ella ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{Se}$  y  $\text{H}_2\text{Te}$ ), se con-

cluye que debería hacer ebullición a los -70 °C y congelarse a los -90 °C (Losiev, 1989). En lugar de hacerlo rompiendo todas las reglas, el agua hace ebullición a los 100 °C y se congela a los 0 °C. Sin embargo, en nubes situadas a una altitud entre 2.000 y 3.000 m es posible encontrar gotas de agua superfrías con temperaturas entre 0 y -25 °C (Moran y Morgan, 1994). Otra particularidad del agua consiste en que es de las pocas sustancias que al solidificarse resulta con una densidad más baja que en su estado líquido; por esto el hielo flota en el agua.

Desde el punto de vista químico es excepcional su importancia, ya que la casi totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza tienen lugar en sustancias disueltas en agua. El agua es un medio de transporte de nutrientes; ese trata de una cualidad muy importante para la vida, ya que para algunos ecosistemas el agua sirve de recipiente de sustancias vitales para su existencia.

El agua tiene otras muchas propiedades, como su facilidad para disolver una gran cantidad de sustancias (de ahí que rara vez sea pura), su fuerte tendencia a empapar las paredes de los tubos capilares y ascender por ellos, su propensión a dejarse atrapar en la constitución de numerosas rocas, en forma de hidratos que, como el ópalo, adoptan a veces los colores más tornasolados.

El agua tiene una capacidad calorífica alta. Su calor específico, por definición, es de una caloría por gramo. Es importante recordar que la mayor parte de la energía solar que llega a la superficie terrestre es absorbida por la hidrosfera, donde se transforma en calor que transporta ella misma o se transfiere a la atmósfera y a otras esferas. Así por ejemplo, en la evaporación de agua de la superficie del océano se transfiere cada minuto a la atmósfera  $2 \times 10^{18}$  julios de energía en forma de calor latente.

Gracias a su capacidad calorífica y a su calor latente, el vapor de agua tiene gran importancia como regulador del clima del planeta. Igualmente, por la capacidad calorífica del agua, las enormes masas oceánicas del planeta impiden las grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche o entre el verano y el invierno, que de otro modo habría que soportar. Se sabe además que los países sujetos a influencias marítimas gozan de climas con menos contrastes de temperatura que los países continentales.

En cuanto a la tensión superficial del agua, es mayor que la de cualquier otro líquido; pero hay más: la compresibilidad del agua, que es escasa, disminuye cuando la temperatura se eleva entre 0° y 50° C, al contrario de lo que sucede con otros líquidos. Asimismo, su viscosidad disminuye, en lugar de aumentar, cuando se eleva la presión.

En la vida cotidiana la percepción directa de las sustancias disueltas en el agua lleva a clasificarla en agua

dulce y agua salada. Al agua natural con una baja concentración de sales (menos de 1.000 mg/L) se le llama agua dulce y generalmente, previo tratamiento, se usa para producir agua potable. El agua natural que contiene una concentración de sales mayor a 3.000 mg/L se considera salada, aunque este término comúnmente se asocia con el agua de mar, que contiene en promedio una concentración de sales entre 34.000 y 35.000 mg/L. Sin embargo, para algunos mares estas concentraciones pueden ser superiores: por ejemplo, para el Mediterráneo y el mar Rojo alcanzan 45.000 mg/L. No obstante, existen distintos grados de salinidad intermedios, como en el caso de las aguas estuarinas y de las ciénagas. Realmente se trata de variaciones en la salinidad por influencia de las aguas continentales y de las lluvias.

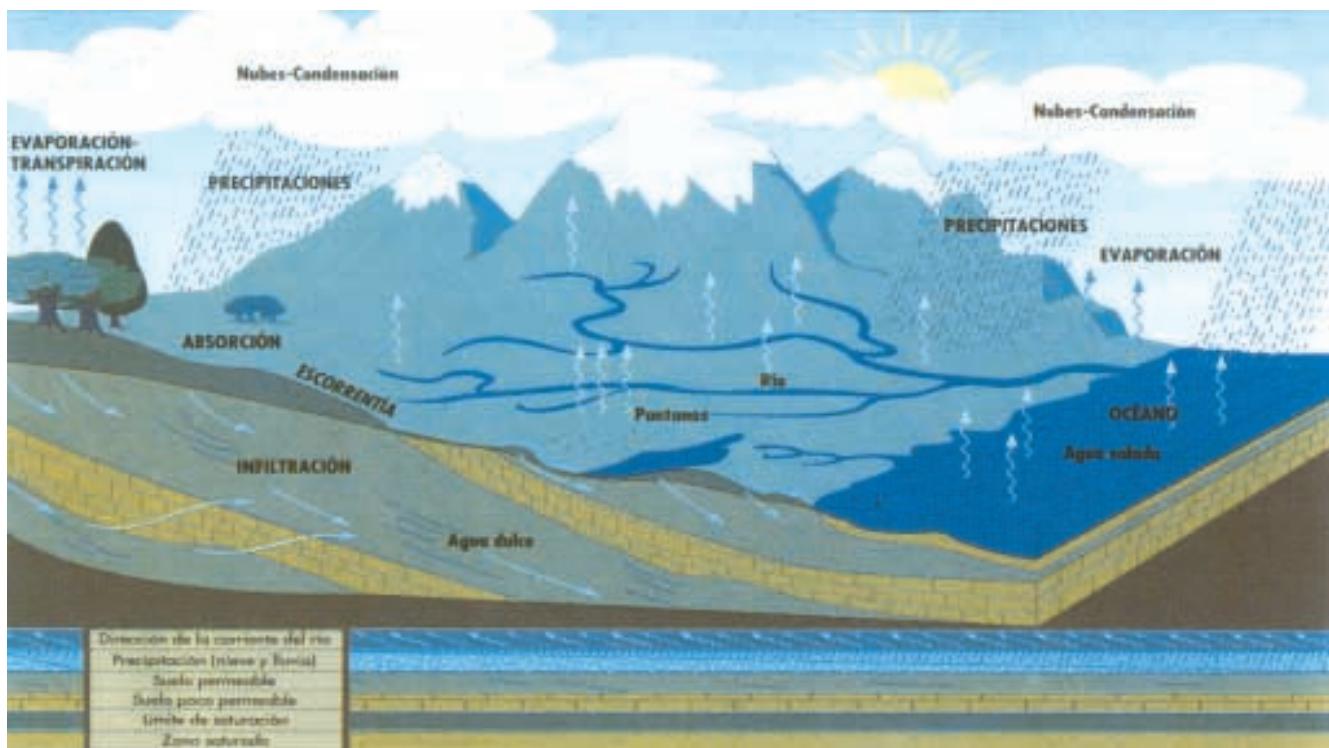
Millones de años atrás la tierra se encontraba desnuda, sin cobertura vegetal, expuesta a la acción del agua y sometida a grandes procesos de erosión. Fue entonces cuando los océanos alcanzaron sus niveles de salinidad básica. Este proceso aún continúa con menor intensidad, pero sin perder importancia. Actualmente, en los ciclos biogeoquímicos –en especial, en el ciclo hidrológico– circulan las sales marinas manteniendo relativamente constante la concentración de sales del mar.

## Ciclo hidrológico

Como se anotó en el capítulo 2 de este libro, dentro de los ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en el ecosistema planetario, el ciclo hidrológico es tal vez el más conocido y ocupa un puesto importante. El ciclo hidrológico es el proceso continuo de la circulación del agua, en sus diversos estados, en la esfera terrestre. Sigue bajo la influencia de la radiación solar, la acción de la gravedad y la dinámica de la atmósfera, la litosfera y la biosfera. Las diferentes fases del ciclo son el marco de referencia para el estudio del estado y del comportamiento del agua.

El ciclo hidrológico y el balance de agua global son el modelo básico para entender el funcionamiento del sistema hídrico atmosférico movido básicamente por la energía solar, el cual es el enlace vital entre el océano y el continente, mediante la circulación y transformación del agua a través de la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera.

El agua se evapora desde el océano hacia la atmósfera en grandes proporciones (86%) y en menor grado desde el continente (14%), siendo el viento el agente transportador del vapor de agua a distancia hasta encontrar condiciones propicias para la condensación, reiniciándose así un nuevo ciclo hidrológico.



**Figura 4.1.** Representación del ciclo hidrológico.

Se estima que el volumen total de agua contenido en la hidrosfera es 1.386 millones de km<sup>3</sup>. De este volumen, 96,5% se encuentra en los océanos como agua salada y el 3,5% restante, como agua dulce proveniente del continente. De este último porcentaje el 69% se encuentra en forma sólida en los glaciares y el 30% como agua subterránea, quedando solamente el 1% que conforma los ríos y los cuerpos de agua (Christophenson, 1997).

Al concluir un ciclo completo, retorna directamente al mar el 78% como precipitación y del 22% restante, precipitado en el continente, el 8% llega al mar por escorrentía superficial y subterránea (Dingman, 1994).

El ciclo hidrológico está gobernado por procesos naturales que ocurren de manera continua (*figura 4.1*). El agua cae sobre la superficie terrestre en forma líquida o sólida (nieve, granizo, etc.), parte de la cual puede ser evaporada antes de tocar la superficie terrestre. Aquella fracción que alcanza la vegetación es parcialmente retenida por las hojas de las plantas (intercepción). De allí una parte es evaporada nuevamente hacia la atmósfera, en tanto que la fracción restante cae hacia el suelo, donde puede infiltrarse o escurrir por las laderas, siguiendo la dirección de las mayores pendientes del terreno.

La fracción que se infiltra puede seguir tres rutas bien definidas: una parte es absorbida por las raíces de las plantas y llega a formar parte del tejido vegetal o bien, es liberada a través del proceso de transpiración hacia la atmósfera. Otra cantidad puede desplazarse paralelamente

a la superficie a través de la zona no saturada del terreno, como flujo subsuperficial, hasta llegar a aflorar en los nacimientos o manantiales o continuar infiltrándose hasta alcanzar la zona saturada, donde recargará el almacenamiento de aguas subterráneas; de esta última, una parte alimenta el caudal de los cursos de agua (donde exista conexión hidráulica) como caudal de base.

La zona no saturada se caracteriza porque el agua se encuentra en los vacíos o poros conjuntamente con aire y está sometida a fuerzas de capilaridad, mientras que a determinada profundidad el agua llena completamente los vacíos del suelo en la zona saturada, estando sometida a fuerzas gravitacionales y viscosas. Las aguas subterráneas, limitadas en la parte inferior por formaciones impermeables (arcillas, formaciones rocosas, etc.), no permanecen estáticas, sino que se desplazan y forman el flujo subterráneo.

Cuando se presentan fracturas o fallamientos en la base de la formación impermeable, el agua subterránea desciende y representa una pérdida de humedad para la cuenca, llegando a formar parte de almacenamientos inactivos. En estas capas profundas, el tiempo de circulación o renovación es mucho más largo que en las capas acuíferas superficiales ubicadas en las zonas no saturada y saturada y, por lo tanto, no participan en el intercambio hídrico activo ni están vinculadas al régimen climático actual. Esta parte del ciclo hidrológico es de orden geológico (tiempo de renovación desde algunas décadas hasta miles de años).

La parte del agua que escurre a lo largo de las laderas puede ser interceptada por las depresiones naturales del terreno, donde se evapora o infiltra, o finalmente se mueve a través de los drenajes naturales de la cuenca y forma el flujo superficial. Estos tres flujos –superficial, subterráneo y subsuperficial– conforman la escorrentía que integra los cauces de las corrientes, alimenta los diferentes almacenamientos y drena finalmente hacia el mar.

Una fase fundamental del ciclo es la evaporación, ya sea del agua contenida en los océanos, en la vegetación, de la proveniente de la superficie del terreno, de los cuerpos abiertos de agua, de las corrientes principales y secundarias o de las zonas no saturada y saturada del terreno; todo ello por acción de la radiación solar.

### Balance hídrico

Para poder estudiar y determinar en forma cuantitativa todos estos procesos físicos que contribuyen a la formación y variación espacio-temporal del recurso hídrico en una zona determinada, se utiliza el balance hídrico, que es una formulación matemática de la interrelación y distribución espacial del agua en sus diferentes fases.

El balance hídrico se basa en la ley física universal de conservación de masas. Representa una de las herramientas de mayor uso en la práctica hidrológica para el estudio de la variación espacial y temporal de los elementos constitutivos del ciclo hidrológico; expresa la igualdad existente entre los aportes de agua que entran por un lado en una unidad hidrográfica determinada y la cantidad de agua que es evacuada por el otro, considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante el periodo de tiempo determinado.

Los balances hídricos, tanto globales como regionales y locales, permiten determinar la disponibilidad hídrica natural de las áreas en consideración y conocer el comportamiento de la oferta de agua, tanto superficial como subterránea, a través del estudio de las diferentes fases del ciclo hidrológico.

La concentración y crecimiento de la demanda de agua en zonas donde la oferta es limitada, la deforestación, el aprovechamiento y el uso indiscriminado y no planificado de los recursos naturales, alteran seriamente el ciclo hidrológico y los componentes del balance hídrico y modifican la disponibilidad de agua, tanto en términos de cantidad como de calidad. La alteración de los procesos que incluyen la sedimentación de los cauces y la agudización de los periodos de sequía e inundación pueden causar efectos catastróficos sobre las actividades humanas y socioeconómicas.

## Oferta hídrica en Colombia

La ubicación geográfica, la variada topografía y el régimen climático que caracterizan al territorio colombiano han determinado que posea una de las mayores ofertas hídricas del planeta. Sin embargo, esta oferta no está distribuida homogéneamente entre las diferentes regiones del país y, además, está sometida a fuertes variaciones que determinan la disponibilidad del recurso hídrico; razones por las cuales en el territorio continental de Colombia se presentan desde zonas deficitarias de agua hasta aquéllas con grandes excedentes, que someten a importantes áreas del país a inundaciones periódicas de duración considerable.

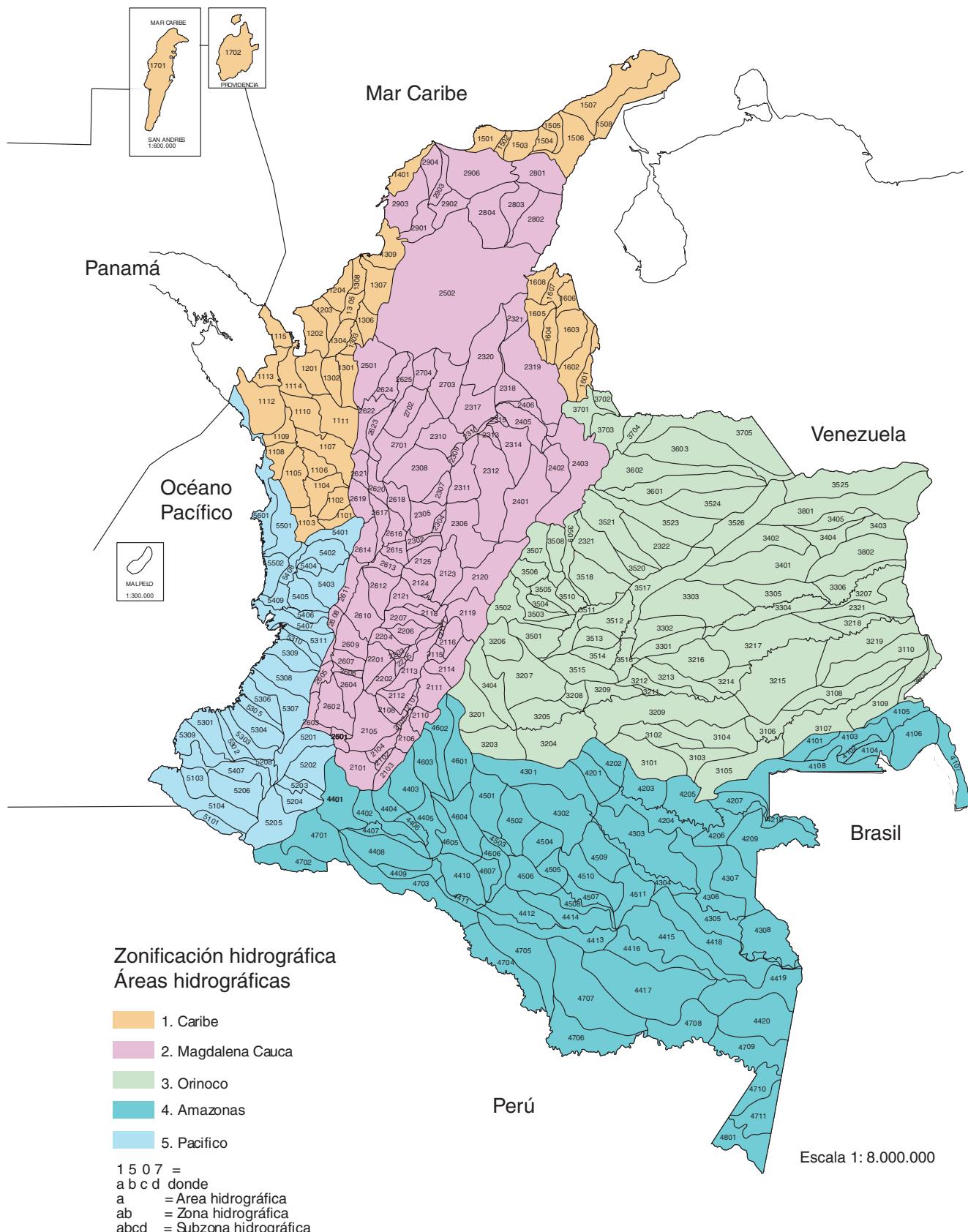
La riqueza hídrica colombiana se manifiesta: en una extensa red fluvial superficial que cubre el país en unas condiciones favorables de almacenamiento de aguas subterráneas, en la existencia de cuerpos de agua léticos, distribuidos en buena parte de la superficie total, y en la presencia de enormes extensiones de humedales.

La presencia de altas montañas, abundantes precipitaciones, extensas sabanas y selvas húmedas, junto con la ubicación estratégica en la zona tropical, caracterizan al territorio nacional y determinan la existencia de ecosistemas con un potencial hídrico valioso y sistemas complejos de regulación.

Si bien se reconoce la riqueza hídrica nacional, tanto en la distribución espacial como temporal, este enorme potencial se restringe en su aprovechamiento por la confluencia de múltiples factores antrópicos que han generado efectos en los componentes del ciclo hidrológico y, en especial, sobre la calidad del agua por la incorporación de residuos a las fuentes que los abastecen. También lo afectan en buena medida los patrones de aprovechamiento, caracterizados por mecanismos de uso poco eficiente del recurso hídrico.

### Balance hídrico nacional

El balance hídrico es la interrelación de las diferentes variables que conforman la ecuación general, la cual constituye la base del modelo del ciclo hidrológico, a partir de la evaluación de precipitación, evapotranspiración potencial, temperatura, escorrentía superficial y evapotranspiración real. Estos datos se basan en las series históricas cuyo origen es la red de estaciones hidrometeorológicas, enmarcadas dentro de la zonificación hidrográfica de Colombia: el país, por sus características hidrotopográficas, se ha dividido en cinco áreas hidrográficas, las cuales han servido para identificar la red con un código, cuyo primer dígito representa el área hidrográfica y los siguientes, las zonas y subzonas donde se ubica cada estación (*mapa 4.1*).



Mapa 4.1. Zonificación hidrográfica de Colombia. (Fuente: Ideam, 1998)

Los mapas temáticos obtenidos y analizados dentro del balance hídrico fueron construidos en escala 1:1'500.000 y tienen como base estaciones de referencia representativas de las diferentes regiones hidroclimáticas del país. Con ese criterio se elabora el balance hídrico general, que permite conocer en forma global el potencial hídrico del país.

A partir de los valores de precipitación obtenidos de observaciones y mediciones de la red pluviométrica y pluviográfica distribuida en todo el territorio, se generó el mapa de isoyetas medias anuales, en tanto que con la información hidrológica y las características fisiográficas y morfométricas de los sistemas hidrográficos se elaboraron las isolíneas de rendimiento y de escorrentía, que caracterizan áreas hidrológicamente homogéneas (*mapa 4.2*).

Para lograr una aproximación global con la información disponible en el país, se evalúa la evapotranspiración real mediante la diferencia de la precipitación y la escorrentía<sup>1</sup>, dado que las fórmulas empíricas no se han evaluado suficientemente para el territorio nacional, dificultando su aplicación en forma extensiva.

Como resultado del balance se estima el ‘índice de aridez’<sup>2</sup> –referido a la característica de un clima o a la insuficiencia de los volúmenes de precipitación para mantener la vegetación–, que representa el mayor o menor grado de la variación de estos volúmenes y suele llamarse déficit de agua. En el *mapa 4.3* y la *tabla 4.1* se clasifican las 45 cuencas con los índices que las caracterizan, desde altamente deficitarias de agua hasta aquéllas con excedentes importantes. A continuación se presenta una evaluación por zonas.

## Zona Andina

En esta zona se ubica la cadena montañosa más importante del país, con las tres cordilleras que atraviesan de sur a norte el territorio nacional y dan origen a los principales ríos que bañan los campos agrícolas y surten de agua a las principales ciudades e industrias del país, y representa la región de mayor desarrollo y mayor presión por el uso del recurso hídrico. Por esta razón es una de las zonas con mayor densidad de la red de monitoreo, constituyéndose en la base fundamental para evaluar la oferta de las principales cuencas de los ríos Magdalena y Cauca.

1 Dentro de los métodos conocidos y avalados por la Unesco, se encuentran los que determinan la evapotranspiración real (ETR) por medio de fórmulas empíricas, utilizando parámetros meteorológicos obtenidos a partir de observaciones directas o estimándola mediante la diferencia de la precipitación y la escorrentía.

2 Índice que permite estimar la disponibilidad espacial del recurso hídrico, de acuerdo con su abundancia o escasez.

La región del Alto Cauca, integrada por los departamentos de Cauca y Valle del Cauca, tiene una escorrentía<sup>3</sup> promedio de 960 mm. Allí se encuentran ríos de orden medio que bañan el sector, tales como El Palo, Piedras, Cofre, Jamundí, Fraile, Tuluá, La Vieja y otros, con un rendimiento medio<sup>4</sup> en la cuenca de 30 L/s/km<sup>2</sup>.

El Cauca Medio, comprendido entre La Virginia (Risaralda) y Caucasia (Antioquia), se caracteriza por el incremento de la escorrentía media a 1.500 mm, siendo notable el aporte de los ríos San Juan y Arma, y además, por la formación del cañón del río Cauca, de gran interés para el país por su potencial hidroenergético.

El Bajo Cauca, considerado entre Caucasia (Antioquia) y su desembocadura en el río Magdalena, se caracteriza por la presencia del río Nechí y de su afluente, el río Porce, que baña un área bastante húmeda, con una escorrentía de 1.700 mm, en promedio. Desde la desembocadura del río Nechí, y en su lento descenso, se encuentran solamente pequeños caños que hacen descender el valor del aporte anual a 1.500 mm, en promedio, para esta zona.

La escorrentía en la cuenca del río Magdalena se caracteriza principalmente por su disminución a medida que el río avanza y se aproxima al mar Caribe: así, en el Alto Magdalena (Huila y parte del Tolima y Cundinamarca) se obtiene una escorrentía media de 1.000 mm.

Dentro de esta área hidrográfica se encuentra la Sabana de Bogotá, cuyo régimen se rige por los sistemas climáticos de los Llanos Orientales y de la cuenca del río Magdalena. La precipitación media para esta zona es de 900 mm y su escorrentía corresponde a una lámina de agua de 310 mm.

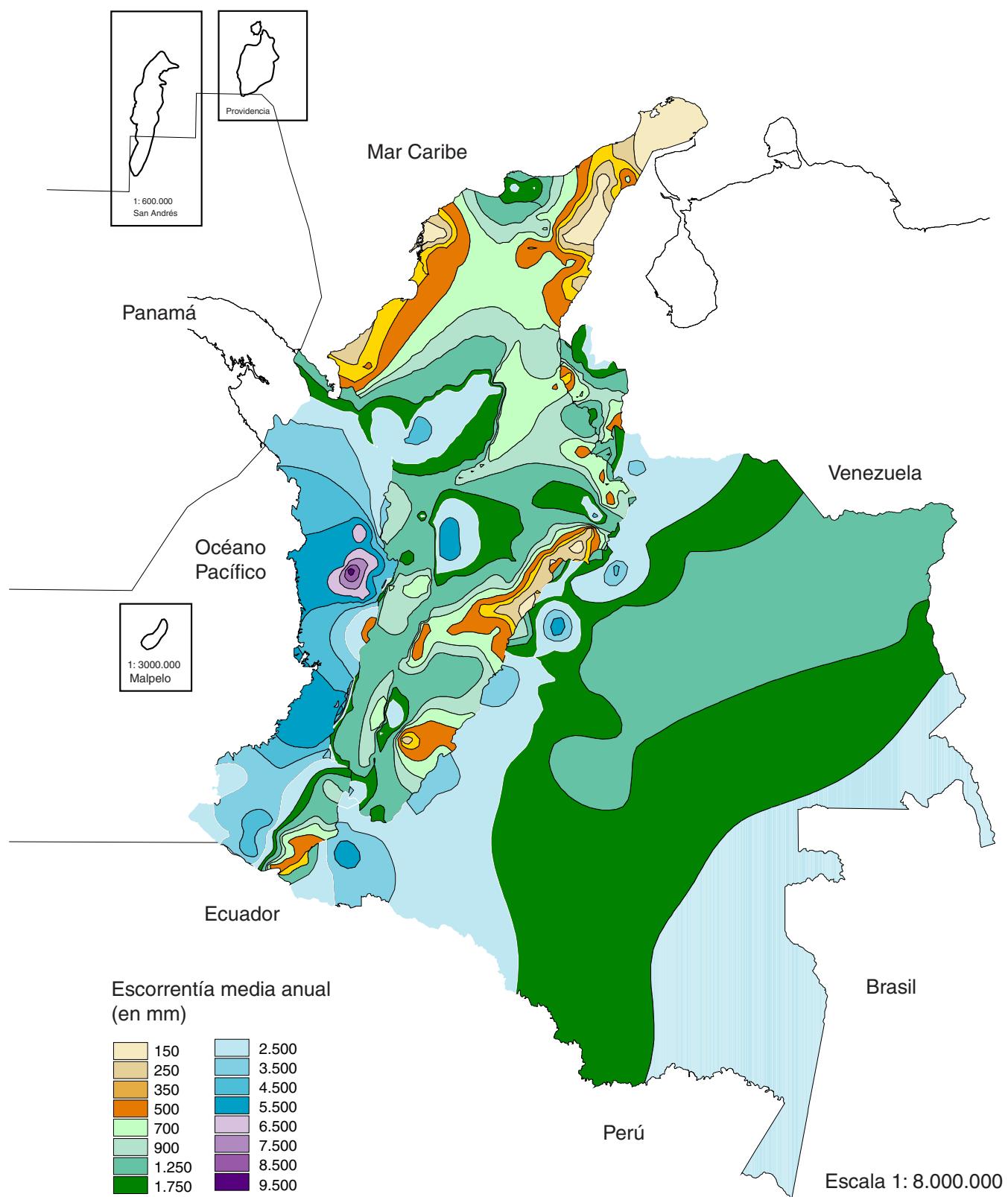
En el Medio Magdalena (Cundinamarca, Santander y sur de Bolívar) la escorrentía media alcanza 1.100 mm, con aportes de ríos con caudales importantes como el Sogamoso, Lebrija, Carare, Cimitarra, Opón y Cesar.

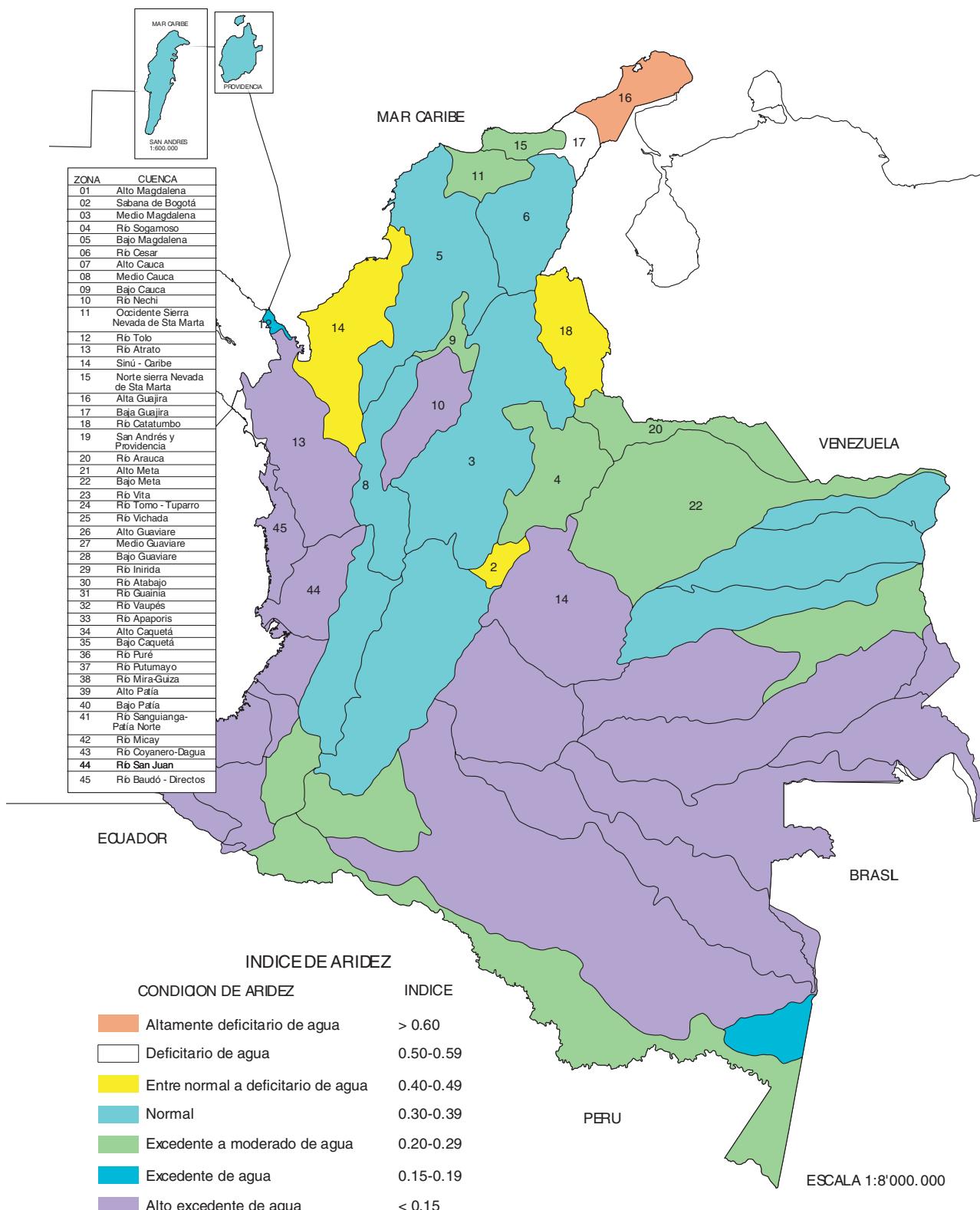
En el Bajo Magdalena (Bolívar y Magdalena), los rendimientos disminuyen en forma notoria, por lo que la escorrentía decrece substancialmente a 450 mm al año.

Si se utiliza el concepto cualitativo del ‘índice de aridez’, casi la totalidad de la cuenca Magdalena-Cauca se encuentra dentro de una disponibilidad de agua normal, a excepción de las áreas hidrográficas del río Nechí y el Bajo Cauca, que cuentan con excedentes de agua, y la Sabana de Bogotá, que entra en la clasificación de disponibilidad normal a deficitaria.

3 Escorrentía es la cantidad de agua precipitada que por no infiltrarse ni evaporarse corre por la superficie de la tierra hasta un cuerpo de agua lítico o lótico. Se expresa en milímetros de lámina de agua, donde un milímetro equivale a un litro por m<sup>2</sup> de superficie

4 El rendimiento de 1 litro/seg/km corresponde a 31,5 mm de lámina de escorrentía.





Mapa 4.3. Índice de aridez

Código	Cuenca	Escorrentía (mm)	Rendimiento (l/seg/km <sup>2</sup> )	Volumen medio (mm <sup>3</sup> )	Volumen seco (MMC)	Índice de aridez
01	Alto Magdalena	1,000	31,75	42,359	27,960	
02	Sabana de Bogotá	305	9,68	7,132	763	
03	Medio Magdalena	1,095	34,76	130,303	93,503	
04	Río Sogamoso	894	28,38	15,521	8,587	
05	Bajo Magdalena	452	14,35	224,952	162,807	
06	Río Cesar	475	15,08	1,665	1,046	
07	Alto Cauca	960	30,48	16,795	7,925	
08	Medio Cauca	1,501	47,65	41,784	26,971	
09	Bajo Cauca	1,730	54,92	72,978	55,844	
10	Río Nechí	1,900	60,32	26,304	19,115	
11	Occidente Sierra Nevada de Santa Marta	550	17,46	851	583	
12	Río Tolo	1,100	34,92	812	356	
13	Río Atrato	3,690	117,14	75,487	57,367	
14	Sinú-Caribe	1,200	3,17	11,817	9,694	
15	Norte Sierra Nevada de Santa Marta	950	30,16	2,055	1,397	
16	Alta Guajira	20	0,63	159	18	
17	Baja Guajira	190	6,03	278	159	
18	Río Catatumbo	940	29,84	11,267	7,259	
19	San Andrés y Providencia	430	13,65	19	12	
20	Río Arauca	2,500	79,36	8,958	7,116	
21	Alto Meta	1,690	53,65	13,832	10,605	
22	Bajo Meta	1,210	38,41	103,379	85,122	
23	Río Vita	1,200	38,10	14,902	12,384	
24	Río Tomo-Tuparro	1,200	38,10	37,255	30,830	
25	Río Vichada	1,500	47,62	32,858	27,509	
26	Alto Guaviare	1,510	47,94	61,486	49,117	
27	Medio Guaviare	1,580	50,16	85,405	72,902	
28	Bajo Guaviare	1,650	52,38	220,474	189,148	
29	Río Inírida	1,530	48,57	97,560	79,773	
30	Río Atabapo	1,700	53,97	7,848	6,339	
31	Río Guanía	1,900	60,32	27,123	23,181	
32	Río Vaupés	1,650	52,38	40,641	35,163	
33	Río Apaporis	1,685	53,49	91,466	77,414	
34	Alto Caquetá	2,440	77,46	36,723	31,357	
35	Bajo Caquetá	1,640	52,06	165,182	325	
36	Río Puré	2,000	63,49	17,222	14,580	
37	Río Putumayo	1,700	53,97	1,505,520	83,214	
38	Río Mira-Guiza	3,000	95,24	27,955	19,796	
39	Alto Patía	945	30,00	7,051	3,793	
40	Bajo Patía	2,450	77,78	40,775	21,586	
41	Río Saquianga-Patía Norte	3,500	111,11	32,289	23,274	
42	Río Micay	4,150	131,75	8,777	6,344	
43	Río Coyanero-Dagua	4,000	126,98	28,833	20,180	
44	Río San Juan	4,410	140,00	65,368	46,234	
45	Río Baudó-Directos	4,000	126,98	40,096	28,035	

**Tabla 4.1.** Cuantificación de los volúmenes de oferta en 45 cuencas representativas para año medio y año seco. (Fuente: IDEAM)

Índice de aridez	Rango del índice	Categoría
■ > 0,6		Altamente deficitaria
■ 0,50 a 0,59		Deficitaria
■ 0,40 a 0,49		Normal a deficitaria
■ 0,30 a 0,39		Normal
■ 0,20 a 0,29		Excedente a moderado
■ 0,15 a 0,19		Excedente
■ < 0,15		Alto excedente

El volumen de agua producido en toda la zona Andina es cercano a 580.000 millones de m<sup>3</sup>, evaluados para un año medio, y se reduce en casi el 30% durante un año de condiciones secas. La distribución de estos volúmenes en las diez zonas hidrográficas consideradas en la cuenca de los ríos Magdalena y Cauca, se presenta en la *tabla 4.1*.

## Zona Caribe

La zona Caribe no es homogénea en lo que a escorrentía se refiere; se distinguen tres áreas muy específicas por sus condiciones climáticas: La Guajira, la Sierra Nevada de Santa Marta y las sabanas del Sinú, San Jorge y Magdalena.

En la media y alta Guajira, la escorrentía fluctúa alrededor de los 25 mm (0,8 L/s/km<sup>2</sup>), mientras que en el piedemonte oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta se incrementa a 190 mm, para alcanzar 1.000 mm a los 2.500 msnm y disminuir luego a 200 mm cerca del casco glacial.

En el complejo cenagoso del río Magdalena (departamentos de Magdalena y Bolívar), la escorrentía anual se estima entre 450 y 500 mm.

En la región Caribe hay todas las variaciones de los índices, con tendencia deficitaria: así, por ejemplo, La Guajira está considerada entre deficitaria y altamente deficitaria de agua; las cuencas de los ríos León, Mulatos y Sinú se encuentran dentro del rango normal a deficitario, y en las cuencas que tienen origen en la Sierra Nevada de Santa Marta el índice indica disponibilidad entre excedente y moderada.

## Zona del Catatumbo

La zona del Catatumbo está representada por la cuenca del río del mismo nombre, ubicada dentro del departamento de Norte de Santander. La escorrentía varía entre 1.000 y 1.500 mm, siendo las microcuencas circundantes a las poblaciones de Abrego y Ocaña las de menor rendimiento, y la parte baja del río Catatumbo (frontera con Venezuela) la de los mayores rendimientos. Su área hidrográfica, por sus características hidroclimáticas especiales está considerada como una zona con disponibilidad de agua entre normal y deficitaria.

## Zona Insular

Las islas de San Andrés y Providencia cuentan con una precipitación media de 1.700 mm, pero su escurrimiento es tan sólo de 430 mm; es decir, 13,6 L/s/km<sup>2</sup>, dada su alta evapotranspiración real, estimada en 1.270 mm. La disponibilidad de agua en estas islas está clasificada entre normal y deficitaria, y su volumen se estima en 19 mi-

llones de m<sup>3</sup> para un año medio y en 12 millones para un año seco (*tabla 4.1*).

## Zona Oriental (Orinoquia-Amazonia)

La Orinoquia presenta una variación de escorrentía decreciente del piedemonte hacia la zona baja. En el piedemonte de la cordillera Oriental se presentan tres zonas, con características pluviométricas diferentes: la parte sur de la serranía de la Macarena, la zona central, que corresponde a las cuencas del alto Meta (ríos Guatiquía, Humea y Upía) y el alto Guaviare (ríos Guayuriba y Ariari), y la zona norte, con las cuencas de los ríos Arauca (ríos Cobugón y Margua) y Casanare.

En la primera de ellas (zona sur), en las cuencas de los ríos Caquetá y Putumayo, la escorrentía corresponde en promedio a 2.500 mm. y 1.700 mm, respectivamente. En la zona central, los promedios llegan a 1.700 mm y en la zona norte, que incluye la cuenca del río Arauca hasta la frontera con Venezuela, registran 1.500 mm.

En las extensas sabanas de los llanos Orientales (bajo Meta y ríos Tuparro, Vichada y Guaviare), la escorrentía fluctúa entre 1.200 mm y 1.500 mm, mientras que en las áreas selváticas, en las cuencas de los ríos Caquetá, Yarí y Putumayo hasta las bocas del río Igara-Paraná, la escorrentía corresponde en promedio a 1.650 mm. En las cuencas fronterizas del oriente colombiano (ríos Guainía, Vaupés y Atabapo), la escorrentía está entre 1.700 mm y 1.900 mm.

Como se observa en el *mapa 4.3*, esta zona está favorecida con el recurso hídrico: casi 65% de su extensión tiene altos excedentes de agua y el resto del área tiene disponibilidad de agua entre normal y excedente.

## Zona Pacífica

Por ser esta zona la de mayor precipitación del país, es también la de mayor rendimiento. En toda la zona del Pacífico –a excepción de la cuenca del río Patía, que cuenta con una escorrentía media de 950 mm en la parte alta y de 2.500 mm en la cuenca baja– se presentan valores entre 3.000 mm y 4.500 mm. La cuenca de mayor escorrentía corresponde a la del río San Juan, con 4.500 mm; le siguen en su orden las cuencas de los ríos Micay (4.150 mm), Baudó (4.000 mm), y Atrato (3.700 mm) y Mira-Guiza (3.000 mm). Se ha considerado la cuenca del río Atrato dentro de esta vertiente por su régimen hidroclimático característico de la zona del Pacífico.

La zona del Pacífico se caracteriza por su alta disponibilidad de agua y por tal razón está clasificada con un índice de excedente alto y con volúmenes muy significativos.

## Estimación de la oferta nacional de agua

Ante la necesidad creciente de evaluar la disponibilidad y el estado actual del recurso hídrico en el país en sus diferentes regiones y municipios y de estimar las condiciones de presión por su uso y las limitaciones de su oferta por efectos de la alteración cada vez mayor de la calidad del agua, en el *Estudio nacional del agua* (Ideam, 1998), se hicieron consideraciones básicas para la sostenibilidad del uso del recurso agua. En este estudio se realiza un análisis de la oferta hídrica y de su variación tanto espacial como temporal. Se estimaron los posibles volúmenes de agua disponibles para tres unidades de análisis: áreas hidrográficas, áreas municipales y áreas que abastecen a las cabeceras municipales. Estos valores se estimaron para determinadas condiciones, que incluyen desde aquéllas con una oferta media anual, hasta con situaciones más desfavorables, correspondientes al mes más seco de un año seco.

Los procesos de desarrollo del país y de sus regiones no han tenido en cuenta de manera suficiente la oferta de los recursos naturales, en general, y del recurso agua, en particular, lo cual genera una mayor vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento para la población y para las diferentes actividades económicas.

Como se consigna al principio del capítulo, los rendimientos más elevados se concentran en las regiones de la Amazonía, la Orinoquia y el Pacífico, donde la densidad poblacional es baja y no existen actividades económicas extensivas.

De acuerdo con los informes del Instituto de Recursos Mundiales y de las Naciones Unidas<sup>5</sup>, Colombia, con una disponibilidad de agua de 33.630 m<sup>3</sup> al año por persona, se sitúa en la situación promedio de América Latina, la cual es casi cinco veces mayor a la disponibilidad promedio del mundo, que apenas alcanza los 7.700 m<sup>3</sup>. Como referencia, el promedio de este indicador para América del Norte es 16.300 m<sup>3</sup>; para Europa, de 4.700; para África, de 6.500 y para Asia, de 3.400.

Según los estimativos del Ideam obtenidos en este estudio, la oferta hídrica total en el país supera los 2.000 km<sup>3</sup> al año, y corresponde a 57.000 m<sup>3</sup> anuales por habitante. Así mismo, se estima que si se incorporan reducciones tanto por alteración de la calidad como por regulación natural, se alcanza apenas una disponibilidad de 34.000 m<sup>3</sup> por habitante al año. Para las condiciones de

año seco consideradas, esta disponibilidad se reduce a 26.700 m<sup>3</sup> al año por persona.

Sin embargo la distribución heterogénea del recurso, de la población y de las actividades económicas en Colombia, hacen que el indicador promedio, relativamente favorable, que ostenta el país sea engañoso, o menos favorable, en la medida en que se consideren exclusivamente las zonas donde se concentra la mayor parte de su población y de la actividad económica, cuencas de los ríos Magdalena y Cauca y las de los ríos que drenan al Caribe colombiano, incluido el Catatumbo, las cuales representan en conjunto sólo el 25% del volumen de agua anual en Colombia. Esta situación se corrobora en los resultados obtenidos sobre volúmenes de agua disponibles y en los indicadores de relación de la demanda sobre la oferta.

En la *tabla 4.2*, se presenta la síntesis de las estimaciones de los volúmenes anuales de agua disponibles y su distribución porcentual, con respecto al total para las grandes cuencas y para los departamentos, tanto para condiciones medias como para las secas, incluida la reducción por regulación y por alteración de la calidad.

Para las cuencas consideradas, las condiciones más críticas corresponden a la Alta y Baja Guajira, río Catatumbo, Sabana de Bogotá y Sinú, en el Caribe. En la escala departamental, agregando la oferta neta evaluada en los municipios y considerando las correspondientes áreas de influencia hídrica, las zonas de mayor afectación de la oferta son: La Guajira, San Andrés, Norte de Santander, Valle del Cauca y Quindío (*tabla 4.2*).

El estudio permite confirmar que, pese a la situación relativamente favorable de oferta y disponibilidad hídrica con que cuenta buena parte del territorio nacional, se presentan señales serias de preocupación, e incluso de alarma, en algunos municipios y áreas urbanas del país.

En Colombia, donde las condiciones climáticas, hidrológicas y topográficas garantizan en la mayoría del territorio una buena oferta de agua y una densa red hidrográfica, no hay suficiente ordenamiento para el uso de los recursos hídricos. Lo anterior determina que aprovechamientos del recurso para los acueductos urbanos, que se abastecen en general (más del 80%) de ríos pequeños, quebradas y arroyos cercanos, no cuenten en su mayoría con programas de conservación de cuencas, sistemas de regulación y almacenamiento, transporte y tratamiento, ni con previsiones económicas para realizarlas.

## Cuerpos de agua

En Colombia existen cerca de 1.600 cuerpos de agua, identificados como lagunas, lagos y embalses, los cuales contienen importantes reservas de agua utilizables, con

<sup>5</sup> Instituto de Recursos Mundiales, Recursos Mundiales 1990-1991. México 1991

Departamento	% de municipios por categoría de oferta de agua, año medio				% de municipios por categoría de oferta de agua, año seco			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Antioquia	21	49	25	5	50	35	10	5
Atlántico	30			70	30			70
Bolívar	37	11		52	45	3	3	50
Boyacá	54	35	8	2	76	17	6	2
Caldas	20	76		4	68	28		4
Caquetá			93	7	0	33	60	7
Cauca	28	58	14		75	14	11	
Cesar	67	17	4	12	75	13		12
Córdoba	31	12	31	27	38	4	38	19
Cundinamarca	48	32	17	4	76	5	15	4
Chocó	0	10	90		10	5	86	
Huila	43	43	11	3	73	22	5	
La Guajira	100				100			
Magdalena	52	5		43	52	5		43
Meta	31	7	62		34	31	34	
Nariño	44	42	15		77	15	8	
Norte de Santander	78	18	5		95	5		
Quindío	25	75			100			
Risaralda	57	29	14		86	14		
Santander	17	80	1	1	93	5	2	
Sucre	88	12			88	13		
Tolima	43	48	2	7	74	20		7
Valle del Cauca	74	19	5	2	88	5	7	
Arauca	29	43	29		29	57	14	
Casanare	16	58	26		26	53	21	
Putumayo	8	31	62		8	46	46	
San Andrés	100				100			
Amazonas		88	13			100		
Guainía		75	25			100		
Guaviare		100				100		
Vaupés		67	33			100		
Vichada	17	17	50	17	17	33	33	17

**Tabla 4.2.** Distribución porcentual de los municipios según la categoría de la oferta hídrica municipal por unidad de área. (Fuente: IDEAM)

Categoría	Rango oferta / unidad de área (MMC/Kms <sup>2</sup> )
Bajo	< 0.60
Medio	0.60 - 1.30
Alto	1.31 - 15.0
Muy alto	> 15

un volumen total aproximado de 26.300 millones de m<sup>3</sup>. El 97,5% de éstos cubren superficies menores de 0,01 km<sup>2</sup> y poseen una profundidad reducida; sin embargo, solamente están estudiados los más grandes, particularmente los ubicados en la región Andina.

Con base en la información disponible, las principales reservas de agua (98% del volumen total) se encuen-

Departamento	Embalses y pequeños almacenamientos		Lagunas		Volumen total (Miles m <sup>3</sup> )
	No.	(Miles m <sup>3</sup> )	No.	(Miles m <sup>3</sup> )	
Antioquia	17	1.808,932	1	20,650	1.829,582
Atlántico		400,000			
Santafé de Bogotá					
Bolívar	10	206,055			206,055
Boyacá	7	914,992	90	2.035,000	2.949,992
Caldas	2	1.532	2	16,530	18,062
Caquetá			16	143,992	143,992
Cauca	70	8.636	9	295	8,931
Cesar			5	924	924
Córdoba	2	1.314	1	60	1.374
Cundinamarca	18	803,244	70	1.418,774	2.222,018
Chocó					0
Huila	225	45.220	10	25,857	71,077
Guajira	1	1.130	55	153,342	154,472
Magdalena	1	60	18	25,635	25,695
Meta			107	152,345	152,345
Nariño	3	20.953	34	1.760,999	1.781,952
Norte de Santander	9	11	27	9,325	9,336
Quindío	5	178	2	102	280
Risaralda			2	7,925	7,925
Santander	4	36.136	44	22,048	58,184
Sucre	1	30	1	18	48
Tolima	48	6.747	49	1.120,668	1.127,415
Valle del Cauca	481	13.447	1	145	13,592
Arauca			34	56,833	56,833
Casanare	1	300	15	33,053	33,353
Putumayo			6	47,530	47,530
San Andrés					0
Amazonas			2	12,900	12,900
Guainía			30	376,185	376,185
Guaviare			18	156,160	156,160
Vaupés			1	27,000	27,000
Vichada			35	181,676	181,676
Total	905	4.268,917	685	7.950,826	12.219,743

**Tabla 4.3.** Agua almacenada en embalses pequeños, almacenamientos y lagunas. (Fuente: Ideam)

tran en 40 grandes lagos, lagunas y embalses, con una superficie de 65,5 km<sup>2</sup>. Así, el volumen total de los 20 lagos y lagunas más grandes es de 4.279 millones de m<sup>3</sup> y el de los 20 embalses más grandes en operación es de 9.736 millones de m<sup>3</sup>. Las reservas de agua en lagos, lagunas y embalses son de 12.220 millones de m<sup>3</sup>, aproximadamente (*tabla 4.3* y *gráfico 4.1*).

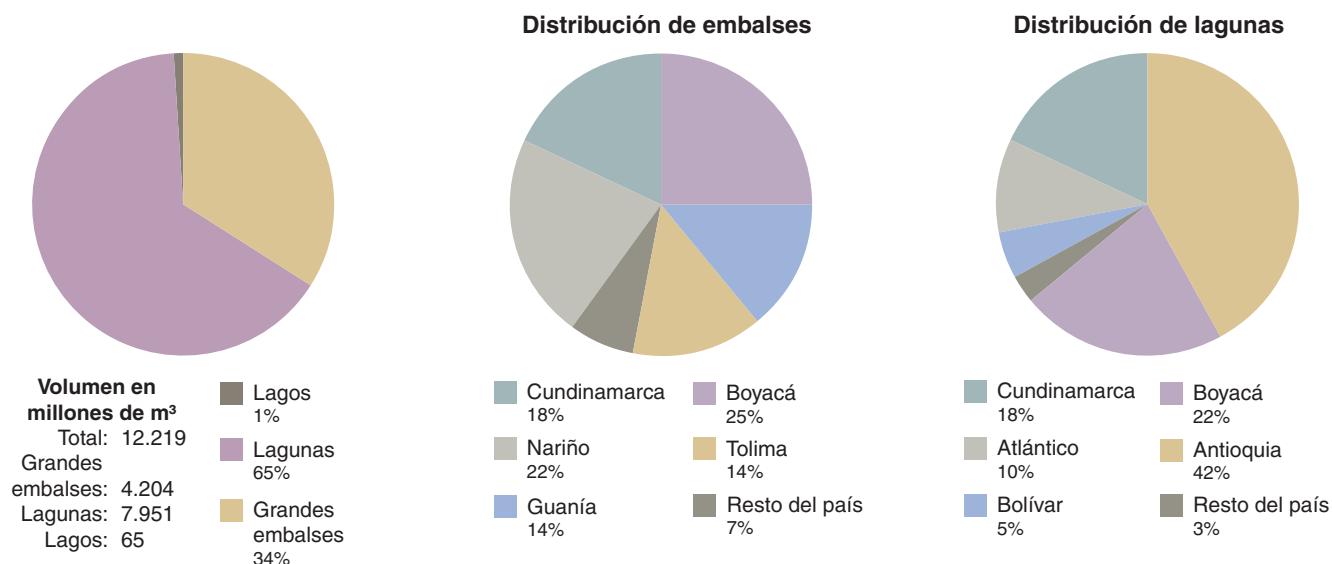


Gráfico 4.1. Distribución de las reservas de agua en lagos, lagunas y embalses en Colombia. (Fuente: IDEAM)

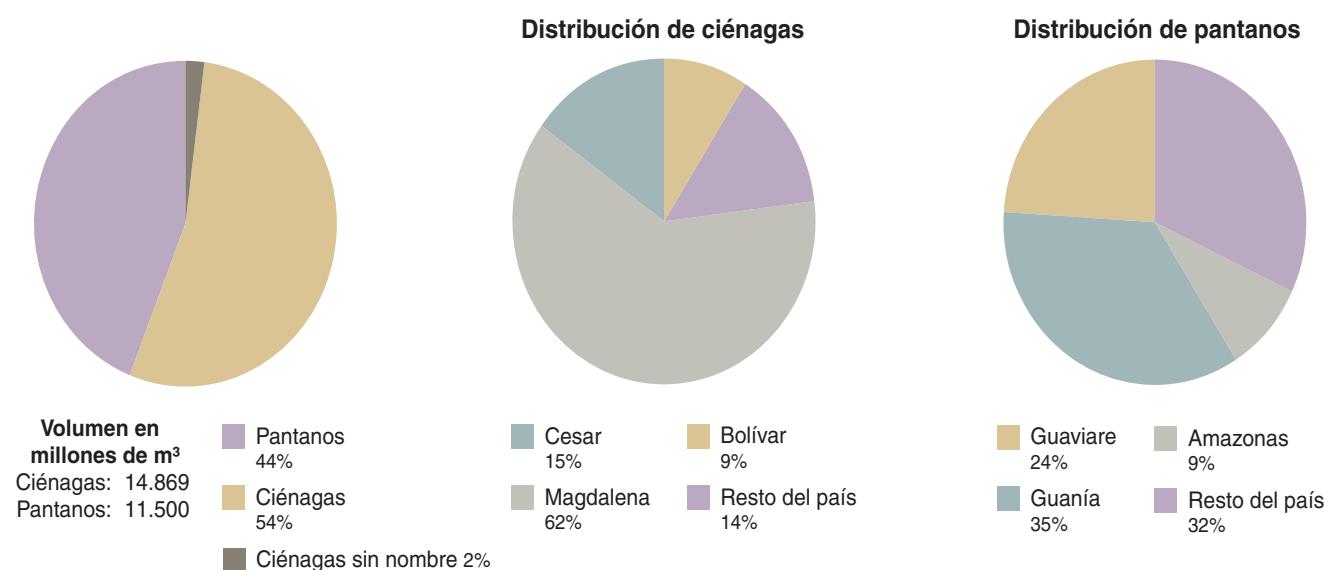


Gráfico 4.2. Distribución del volumen de agua en ciénagas y pantanos. (Fuente: IDEAM)

Las ciénagas son el elemento básico constituyente del plano inundable, razón por la cual sus formas y tamaños, considerados en un año hidrológico, están en función del nivel del agua en el sistema. Dichos planos inundables son los receptores globales de las masas de agua provenientes de las lluvias a lo largo de las cuencas y las ciénagas; por su constitución, mantienen conexiones con los ríos principales a través de canales de características meandriformes. De esta forma, tiene especial importancia el monitoreo continuo del complejo cénago del río Magdalena, incluyendo afluentes como los ríos San Jorge y Cauca, por representar cerca del 70% de la superficie ocupada por las 1.900 ciénagas plenamente

identificadas en el país. El 30% restante pertenece en forma mayoritaria a las cuencas de los ríos Atrato y Sinú.

Hay también 13.334 cuerpos de agua no identificados, que en un alto porcentaje presentan características de ciénagas, con una superficie de 12,9 km<sup>2</sup>. El área total de la superficie líquida es 60,8 km<sup>2</sup>, y el 57,5% de ella corresponde a los departamentos de Bolívar y Magdalena. El volumen total almacenado es aproximadamente 15.000 millones de m<sup>3</sup> (*tabla 4.4*).

Generalmente, los ambientes pantanosos se caracterizan por una saturación permanente de humedad, estancamiento y escasa fluidez en los horizontes superiores del suelo y del subsuelo. La superficie total de los panta-

Departamento	Ciénagas			Ciénagas sin nombre			Pantanos	Volumen total miles m <sup>3</sup>
	Cantidad	Volumen (miles m <sup>3</sup> )	Área (miles de m <sup>2</sup> )	Cantidad	Volumen (miles m <sup>3</sup> )	Área (miles de m <sup>2</sup> )	Área (miles de m <sup>2</sup> )	
Antioquia	92	224.532,8	14.249,0	197	1.794,0	1.085,0	39.575,0	226.326,8
Atlántico	22	54.387,5	10.390,0	120	190,0	1.130,0	550,0	54.577,5
Bolívar	645	1.281.432,7	113.736,0	3.549	57.790,3	35.813,0	59.235,0	1.339.223,0
Boyacá	3	6.025,3	731,0	86	261,5	167,0	3.000,0	6.286,8
Caldas	4	456,8	126,0	4	24,9	12,0		481,7
Caquetá				18	11.050,0	1.250,0	12.200,0	11.050,0
Cauca	2	210,0	75,0	42	440,0	185,0	250,0	650,0
Cesar	110	2.183.203,9	45.781,0	778	10.453,7	5.938,0	2.025,0	2.193.657,6
Córdoba	289	550.728,0	29.045,0	695	6.182,3	4.596,0	50.885,0	556.910,3
Cundinamarca	2	170,0	60,0	267	1.861,3	805,0	147,0	2.031,3
Chocó	127	161.808,2	17.267,0	329	3.553,2	2.295,0	44.550,0	165.361,4
Huila	1	470,0	100,0	5	2.269,0	235,0		2.739,0
Guajira	100	80.633,0	5.967,0	164	1.399,6	815,0		82.032,6
Magdalena	189	9.026.217,7	155.904,0	1.561	54.575,9	23.938,0	28.100,0	9.080.793,6
Meta	9	4.372,9	650,0	731	32.191,0	5.381,0	16.225,0	36.563,9
Nariño				10	824,0	183,0		824,0
Norte de Santander	1	32,4	18,0	30	417,0	112,0		449,4
Quindío				1	6,0	3,0		6,0
Risaralda				11	45,5	27,0	250,0	45,5
Santander	66	266.869,3	22.304,0	288	38.888,8	8.325,0	5.301,0	305.758,1
Sucre	234	575.388,1	32.279,0	1.490	13.658,1	10.059,0	30.675,0	589.046,2
Tolima				180	1.663,4	723,0	350,0	1.663,4
Valle del Cauca	39	18.700,5	2.652,0	63	1.281,4	395,0	3.075,0	19.981,9
Arauca	2	75,0	35,0	291	7.161,2	1.428,0	33.345,0	7.236,2
Casanare	1	310,0	50,0	2.060	20.372,4	8.532,0	44.725,0	20.682,4
Putumayo							110.900,0	
San Andrés				4	2,1	3,0		2,1
Amazonas				23	85.090,0	5.700,0	178.650,0	85.090,0
Guainía				34	41.410,0	4.100,0	697.500,0	41.410,0
Guaviare				65	34200,0	4.500,0	475.500,0	34.200,0
Vaupés				1	672,0	80,0	127.500,0	672,0
Vichada				232	3.698,0	1.270,0	3.475,0	3.698,0
Total	1.938	14.436.024,1	451.419,0	13.329	433.426,6	129.085,0	1.967.988,0	14.869.450,7

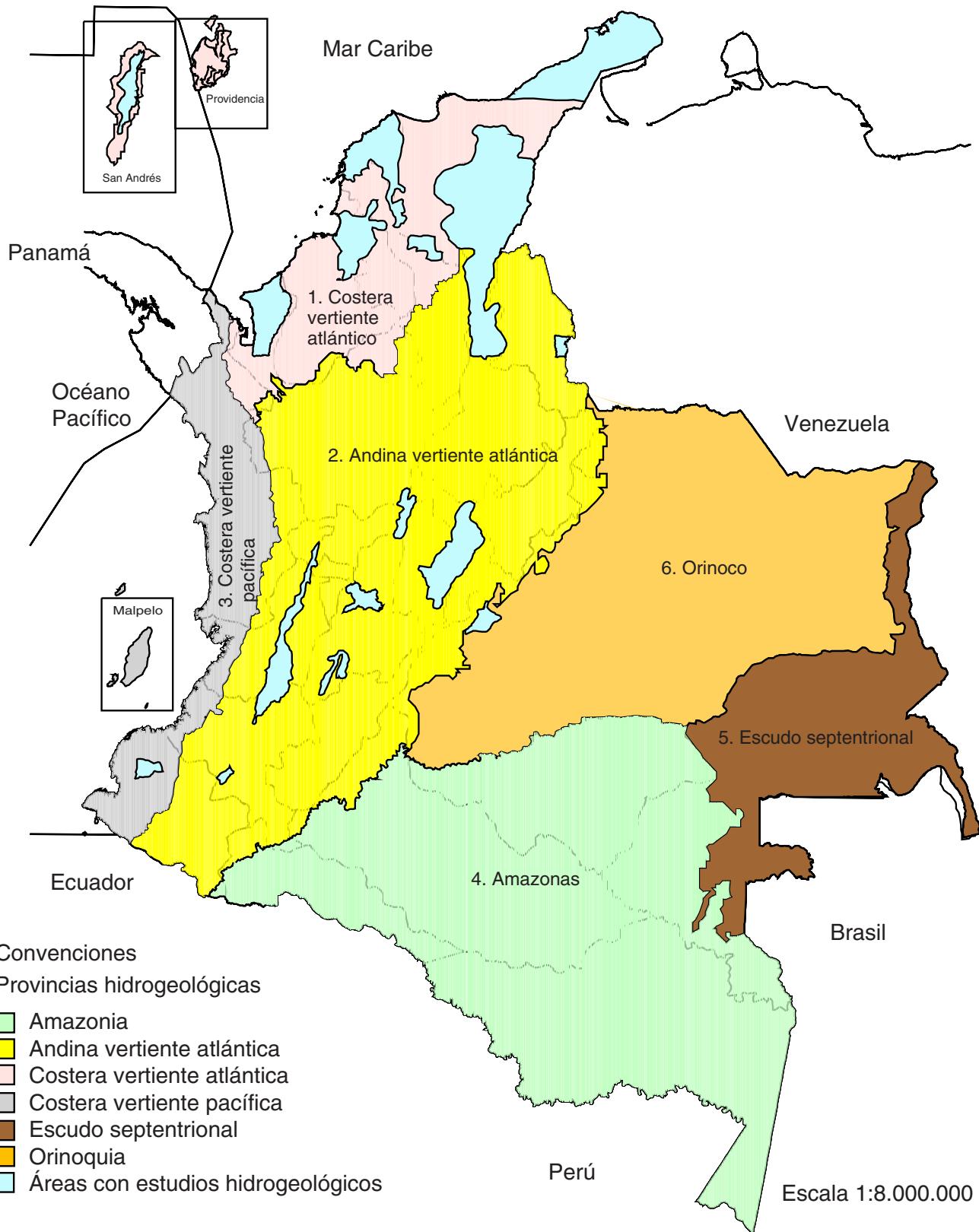
Tabla 4.4. Agua en ciénagas y pantanos. (Fuente: IDEAM)

nos en Colombia es aproximadamente 200 km<sup>2</sup>, y representa cerca de 2% del área continental de Colombia; se distribuye geográficamente, concentrándose en los departamentos de Amazonas, Guainía y Guaviare, con un porcentaje equivalente a 60% (*gráfico 4.2*).

Aunque no ha sido posible establecer el volumen real de agua almacenada en las zonas pantanosas, se puede estimar considerando un espesor medio de 0,2 m (interfaz suelo-agua). Si se acepta la hipótesis anterior y que los pantanos contengan en promedio un 95% de agua, se

puede estimar que el volumen total de agua en los pantanos colombianos es de casi 11.500 millones de m<sup>3</sup> (*tabla 4.4*).

El conocimiento básico de los cuerpos de agua tiene como apoyo de la cartografía existente, las imágenes satelitales que permiten, a partir de su procesamiento e interpretación, la actualización y complementación del inventario. En el *mapa-imagen 4.1* se muestra el área correspondiente a la costa Caribe, entre las coordenadas 72° a 76° oeste y 8° a 11° norte, que cubre parte de



**Mapa 4.4.** Provincias hidrogeológicas. Basado en los mapas de provincias y áreas con estudios hidrogeológicos. (Fuente: Ingeominas, 1988)

los departamentos de Magdalena, Atlántico y Cesar. En este *mapa-imagen*, que forma parte del mosaico de todo el territorio nacional, se señalan los cuerpos de agua de mayor área, detectados por el radar en la fecha de toma (noviembre 11 de 1996); se pueden identificar claramente las siguientes ciénagas: Grande de Santa Marta, Plato o Zárate, María La Baja y el embalse del Guájaro, entre otros.

## Aguas subterráneas

El agua subterránea puede también denominarse agua de subsuperficie, para diferenciarla de las aguas que circulan o se depositan en la superficie. Esta agua, que se ha percolado o infiltrado en las zonas saturadas y no saturadas del subsuelo, llena los poros del material, y su naturaleza y distribución están controlada por las condiciones físico-químicas e hidráulicas de los suelos y macizos rocosos y, además, por la litología, estratigrafía y estructura de los depósitos y formaciones geológicas.

Para los estudios del agua subterránea, el país se ha dividido en seis grandes provincias hidrogeológicas: Andina-vertiente Atlántica, Costera-vertiente Atlántica, Costera-vertiente Pacífica, Amazonas, Orinoco y Escudo Septentrional; cada una de ellas con características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas propias.

En general pertenecen a una o varias cuencas hidrográficas y los límites de estas provincias son en su mayoría hidrogeológicos. La visión global de la distribución regional del agua subterránea en Colombia, la determinación de las áreas potencialmente acuíferas y la caracterización regional de la calidad química del agua se encuentran sintetizadas en el *Mapa hidrogeológico de Colombia*, a escala 1:2.500.000, publicado por el Ingeominas en 1989.

Los estudios hidrogeológicos en el país no abarcan más de 15% del total de áreas con posibilidades de explotación de aguas subterráneas ( $414.375 \text{ km}^2$ ), con unas reservas estimadas totales de  $140.879 \text{ km}^3$ , equivalentes a cerca de 70 veces el total de aguas superficiales del país, estimadas en  $2.097 \text{ km}^3$  (Marín, 1992; Ingeominas, 1997). En el *mapa 4.4* se observan las áreas que cuentan con estudios regionales dentro de sus provincias hidrogeológicas respectivas.

Las provincias hidrogeológicas del Amazonas, el Orinoco y el Escudo Septentrional (oriente colombiano, que cubre parcialmente a los departamentos de Vichada, Guainía y Vaupés) carecen de estudios sobre su potencialidad. En el caso del Vaupés, las posibilidades de contener este recurso son ínfimas, por sus características geológicas particulares.

Las áreas con mayor tradición de explotación de agua subterránea y con estudios regionales corresponden a la Media Guajira, Cundinamarca y Valle del Cauca, seguidos por Cesar, Norte de Santander, Tolima, Córdoba, Magdalena, Sucre, Atlántico y Boyacá. En menor proporción se explota este recurso en San Andrés y en el piedemonte Llanero.

En general, en Colombia se extrae agua subterránea de depósitos recientes y de unidades sedimentarias terciarias y cretácicas mediante pozos, con profundidades que varían entre 50 y 300 m. En la *tabla 4.5* se resume las características generales definidas para las áreas con mejores posibilidades de explotación, a partir de los estudios regionales realizados por Ingeominas y otras entidades, compilados por aquél en documentos sucesivos que ilustran el panorama regional de la distribución de la oferta en el país.

La información es aproximada, pues en la actualidad no existe un inventario total e integrado ni un monitoreo o seguimiento de las captaciones subterráneas. Se tiene algunas estimaciones e información de áreas con posibilidades importantes de aprovechamiento.

## Zonas inundables

Las características de la red de drenaje superficial que cubre el territorio nacional determinan que en las cuencas bajas de los ríos las zonas adyacentes a los cauces naturales sean susceptibles de ser inundadas periódicamente por los ríos de origen aluvial, generalmente anchos y con un caudal de estiaje permanente, cuyas crecientes son inicialmente lentas y de larga duración. Esta susceptibilidad natural se ha aumentado por procesos de alteración en el uso del suelo y de deforestación de las cuencas altas, con el consecuente aporte de sedimentos que, al depositarse en los cauces, modifican los patrones naturales de flujo.

En los ríos de régimen torrencial, cuya cuenca aportante es generalmente reducida y su caudal de estiaje pequeño, con secciones transversales estrechas y pendientes abruptas, se presentan crecientes súbitas cuando la cuenca reacciona a la acción de tormentas fuertes y localizadas, ocasionándose crecientes repentinas y de corta duración.

En la región Andina existe una ocupación humana de las márgenes de los ríos, con asentamientos para el desarrollo de diversas actividades productivas, razón por la cual las inundaciones ocasionan anualmente efectos negativos sobre la población y pérdidas materiales y económicas.

En el *mapa 4.5* se presenta una aproximación a la distribución espacial de las principales áreas del país susceptibles de ser inundadas. En esta definición de áreas inundables es importante establecer que para las zonas del Amazonas y de los llanos Orientales se ha hecho el

# mapa 4.5

Zona	Área km <sup>2</sup>	Tipo de acuífero	Rango Número de pozos	Rango de caudales Lps	Rango profundidad pozos (m)	Recursos dinámicos MMC/año	Uso (1)	Calidad del agua
Media Guajira	3.200	Confinado-semiconfinado	1000-5000	May-40	60-240	82,0	Ap,ad	Salobre, dura
Cuenca río Cesar	30.000	Libre	501-1000	Oct-50	40-120	506,0	Ad,ap,ir,gr,id	Dulce-mod. dura
Valle inferior Magdalena	32.000	Libre	51-500	Oct-80	50-150	89,0	Ir,ap,ad	Mod. dulce y dura
Cuenca río Sinú	25.000	Semiconfinado-libre	51-500	15-50	60-250	115,0	Ap,ad,ir	Dulce y dura
Canal Dique	6.500	Confinado-libre	51-500	05-Oct	100-200	7,5	Ap,ir,id, gr	Mod. dulce
Atrato-San Juan	29.250	Libre	Menor 50	Oct-30	50-100	3.790,0	Id,ad,ap	Mod. dura
Valle alto Magdalena	10.000	Semiconfinado-libre	51-500	Oct-80	60-120	190,0	Ir,id,ad, ap,gr	Dulce-mod. dura
Cuenca río Cauca	4.600	Semiconfinado-libre	1001-5000	30-130	100-200	3.000,0	Ap, ad, ir, ag, id	Dulce-dura
Valle medio Magdalena	26.000	Semiconfinado	Menor 50	May-15	60-140	205,0		Dulce-mod. dura
Cuenca río Patía	12.000	Libre	Menor 50	15-30	50-80	33,0	Ap, ad	Mod. dulce-dura
Cuenca río Tachirá	3.500	Libre-confinado	50-500	Oct-30	50-120	165,0	Ap	Mod. dulce y dura
Sabana de Bogotá	4.300	Libre-confinado	Mayor 5000	May-80	50-500	560,0	Ad, ir, id	Dulce-dura
Altiplano cundiboyacense	76.000	Libre-confinado	500-1000	May-30	100-250	1.110,0	Id, ir, ad, ap	Dulce-mod. dura
Piedemonte llanero	152.000	Libre-confinado	Menor 50	May-80	50-200	685,0		Dulce-mod. dura
San Andrés	25	Confinado	Menor 50	01-May	50-80	1,5	Ap, ad	Dulce-salobre

**Tabla 4.5.** Resumen de las características generales de las aguas subterráneas en el país, por zonas hidrogeológicas.

(1) Convenciones.

Ap: Abastecimiento público  
Ad: Abastecimiento doméstico

Id: Uso industrial  
Ir: Agua utilizada irrigación

Ag: Agua utilizada en agro-industria  
Gr: Agua utilizada en ganadería

análisis respectivo, en particular, a partir de información sobre las características geomorfológicas; en tanto que para las zonas del Bajo Magdalena y del río Sinú, además de lo identificado a través del comportamiento hidrológico registrado, se cuenta con información de algunos estudios de detalle sobre aspectos diversos, que permiten avanzar en el conocimiento de los procesos de inundación que allí se manifiestan.

En términos generales, el área total susceptible de inundaciones en Colombia supera los 102.000 km<sup>2</sup>. De esta área, la cuenca Magdalena-Cauca representa menos del 25% del total, pero tiene una importancia especial porque allí se concentra el mayor componente poblacional del territorio colombiano (*figura 4.2*). Considerando la alta vulnerabilidad de la población que habita en las márgenes de los ríos, las áreas más estudiadas, en cuanto a inundación se refiere, son la parte baja de la cuenca Magdalena-Cauca y las cuencas media y baja de los ríos Sinú y San Jorge.

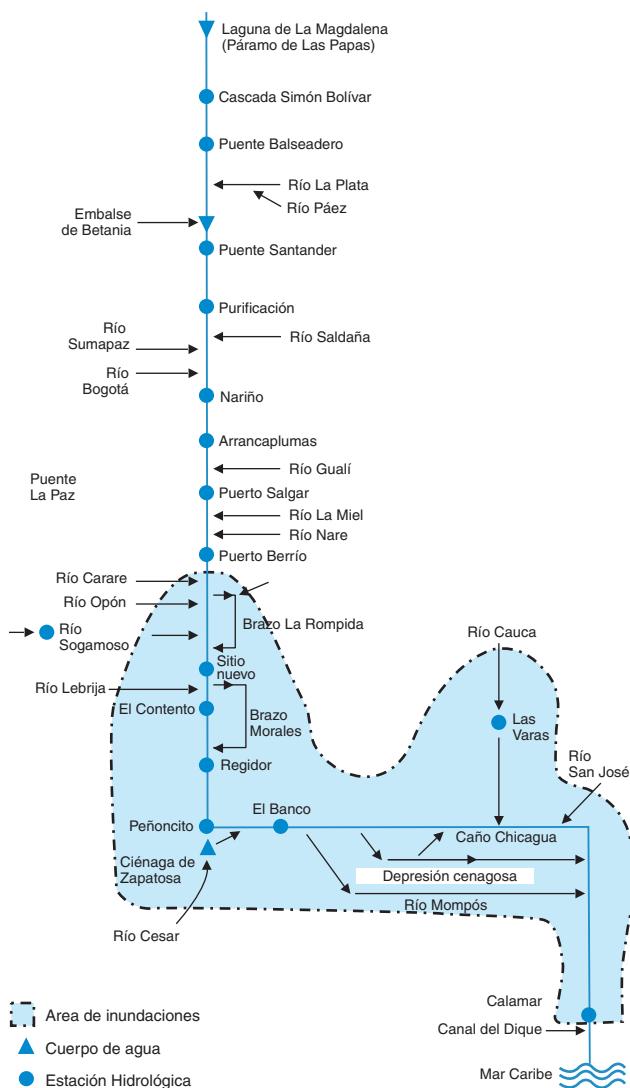
El panorama de grandes extensiones de tierras inundadas por el desbordamiento de los ríos, o por el escaso drenaje de algunas regiones, no puede atribuirse a un incremento en la magnitud misma de los eventos ni a variaciones sustanciales en los períodos de recurrencia. Los daños ocasio-

nados por las inundaciones sí se han incrementado significativamente, en buena medida, por el desconocimiento sistemático de que las riberas de los ríos (planicies inundables) pertenecen por naturaleza a los niveles altos asociados a períodos de abundantes lluvias, los cuales también forman parte del régimen hidrológico de los ríos.

## Comportamiento del recurso hídrico superficial en 1995-1997

Se presenta aquí la evaluación espaciotemporal de las características del régimen hidrológico de los principales ríos colombianos, y un análisis comparativo de los caudales líquidos para estos tres años, con respecto al hidrograma medio mensual multianual y los correspondientes volúmenes acumulados. En particular, se compara la amplitud de variación de los hidrogramas medios mensuales de 1995-1997 con la del hidrograma medio mensual multianual.

La evaluación espaciotemporal del recurso hídrico se efectuó con base en un análisis de ciclos, en el cual se



**Figura 4.2.** Principales afluentes y estaciones hidrológicas del río Magdalena. (Fuente: IDEAM)

consideran los registros de caudal, tanto en el ámbito anual como mensual; esto, con el propósito de detectar las fases de humedad que han caracterizado los últimos 20 años e identificar las regiones que presentan homogeneidad en la génesis del caudal.

También se incluyen observaciones sobre niveles en los ríos, particularmente en cuanto a la navegabilidad para los ríos Magdalena, Cauca, Atrato, Meta, Putumayo y el canal del Dique.

Como un aspecto importante se presenta la relación de eventos extremos, con énfasis en niveles máximos, basados en la información proveniente de las estaciones de la red de alertas.

Finalmente se presentan las condiciones generales de los sedimentos en los ríos, al igual que su caracterización en el nivel nacional, en términos de concentración de

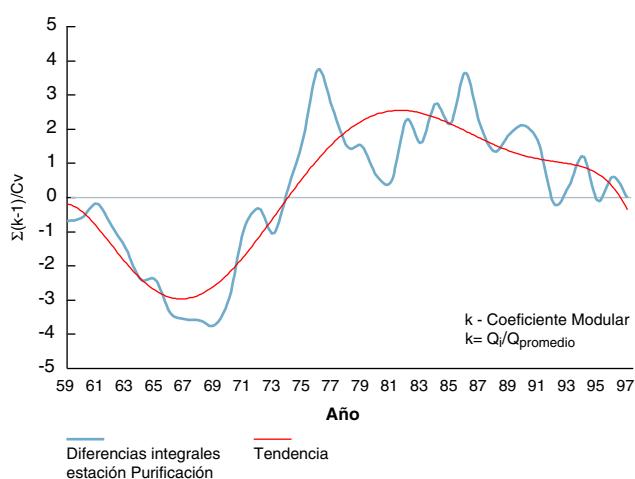
sedimentos y de su transporte, a partir de los registros en los ríos colombianos durante los últimos 15 años.

## Variación de los caudales en Colombia en 1995-1997

La evaluación del recurso hídrico representa el análisis de su variación espaciotemporal en las diferentes zonas del territorio nacional; con este fin, en las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, Sinú, Atrato, San Juan, Patía, Mira, Catatumbo, Meta y Putumayo, se seleccionaron estaciones ubicadas en diferentes zonas características del río para cubrir la representatividad hidrológica. Esta información hidrológica, expresada a través de las series de caudales, se sometió a un análisis que permite identificar la presencia de fases de alta y baja humedad en el periodo de los registros históricos (*mapa 4.6*).

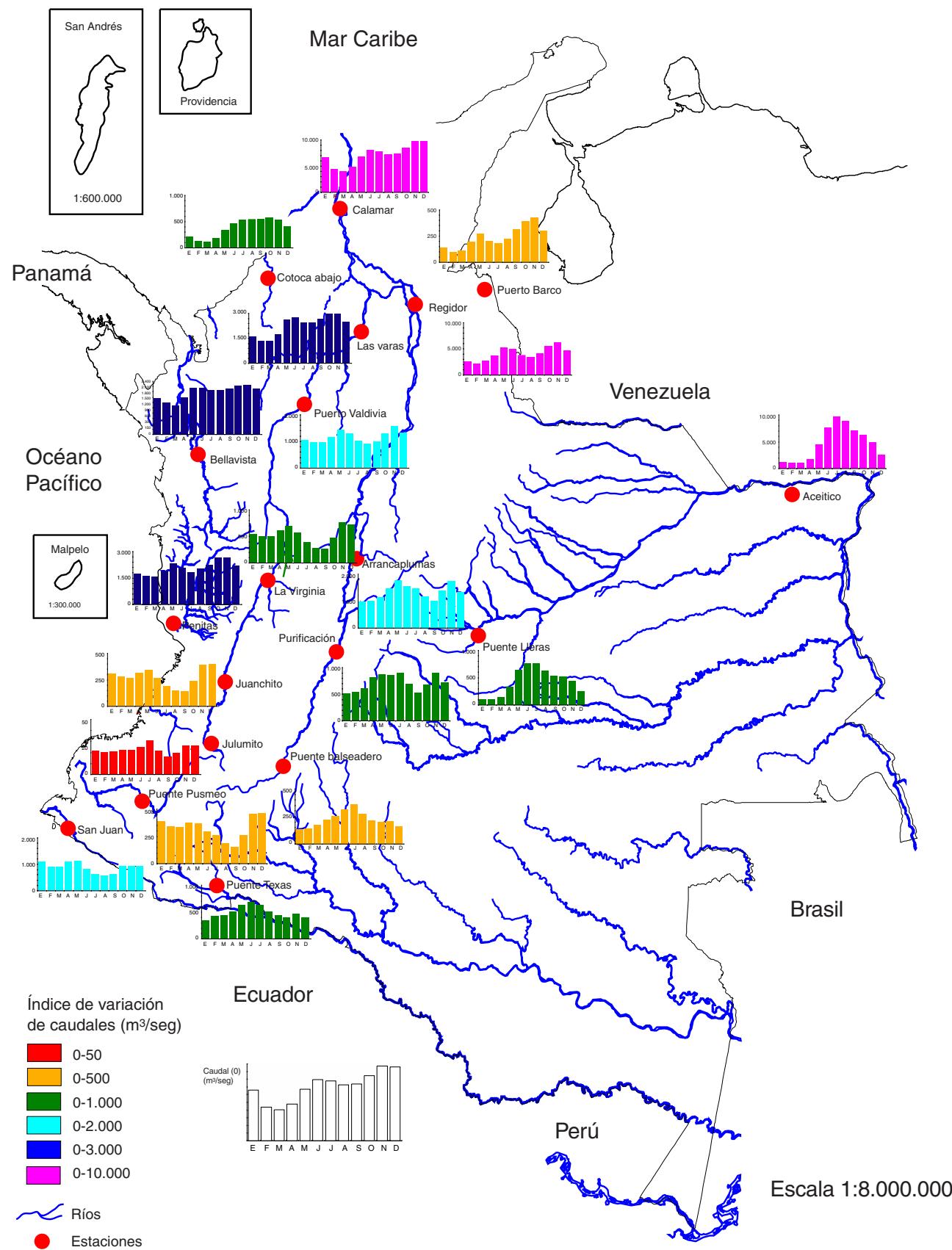
Se considera representativa la serie que define en sus registros como mínimo dos fases, una de alta y otra de baja humedad<sup>6</sup> (*gráfico 4.3*). Para identificar estos ciclos, se evaluaron las series de caudales, tanto anuales como mensuales, pues es en estas últimas en las que se evidencia con mayor claridad las anomalías específicas para evaluar variaciones significativas en el régimen hidrológico de los ríos. La presencia alternada de ciclos de alta y baja humedad son una consecuencia lógica de los procesos naturales que predominan en una zona de la cuenca.

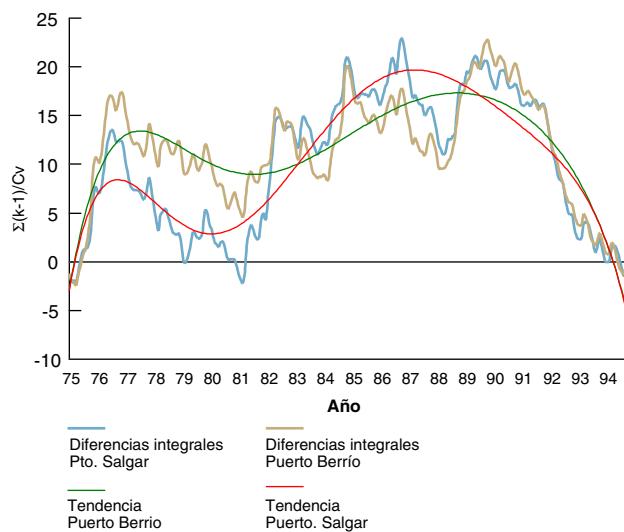
La manifestación de tendencias semejantes, en cuanto a variaciones, permite determinar condiciones similares



**Figura 4.3.** Curvas de diferencias integrales. (Fuente: IDEAM, 1997)

6 Por fase de alta o baja humedad se entiende un periodo de varios años, en los que se mantiene la curva de diferencias integrales sobre el eje del tiempo, para la fase de alta humedad, o bajo éste para la fase de baja humedad.





**Gráfico 4.4** Curvas de diferencias integrales  
(Fuente: IDEAM 1997)

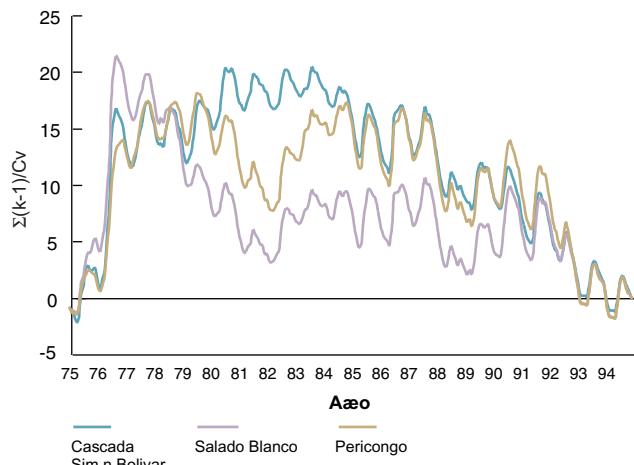
de formación del recurso hídrico al compararlas en diferentes puntos de observación, o estaciones hidrométricas (*gráfico 4.4*). Con base en el análisis de las curvas de diferencias integrales<sup>7</sup>, se infiere la fase del ciclo que rige actualmente para los caudales de la estación en estudio.

Para los tres últimos años, 1995-1997, además del análisis de amplitudes, se presentan observaciones acerca del coeficiente de variación ( $C_v$ ), que representa la variabilidad de la serie (en este caso, la variabilidad de los caudales medios mensuales de cada año) con respecto a su promedio anual. Es importante anotar que cuando el coeficiente de variación fluctúa entre 0,00 y 0,20, se tiene un hidrograma estable, con valores muy cercanos al promedio durante todo el año; si lo hace entre 0,20 y 0,50, se tiene un hidrograma afectado por variabilidad media, y si el coeficiente de variación es mayor de 0,50, el hidrograma está influenciado por una alta variabilidad.

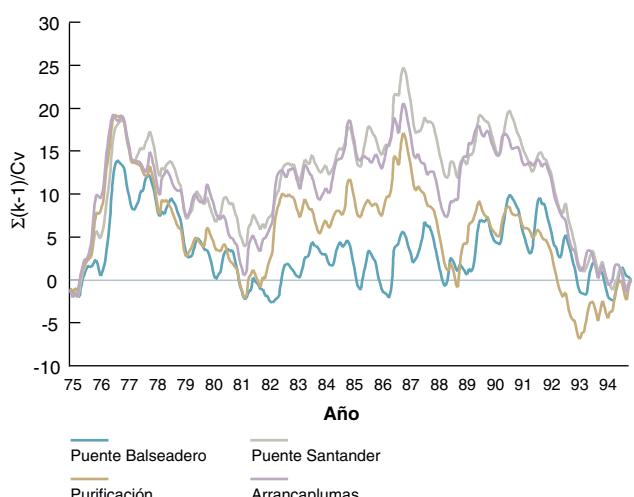
## Río Magdalena

El Magdalena, en su larga travesía se ve afectado por una gran variedad de factores físicos, químicos, geológicos y climáticos que influyen en la génesis del recurso hídrico y determinan su disponibilidad natural en el país (*figura 4.2*).

Para el Alto Magdalena, el análisis de los registros de caudal de los últimos 20 años correspondientes a la estación Cascada Simón Bolívar, define el régimen general con una fase de alta humedad. Durante este ciclo no se observan disminuciones significativas en el régimen men-



**Gráfico 4.5** Curvas de diferencias integrales.  
(Fuente: IDEAM 1997)



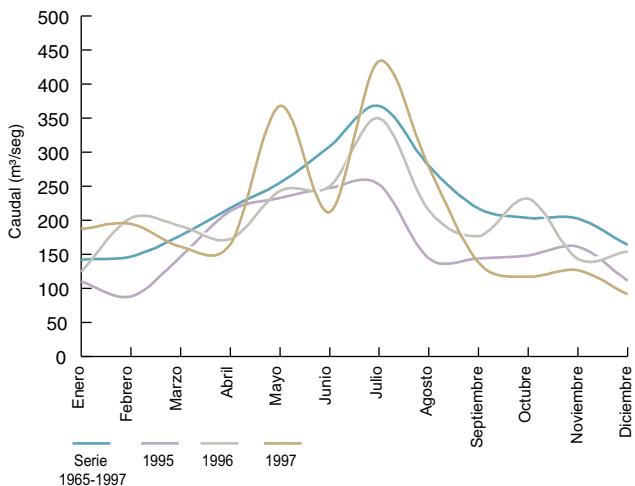
**Gráfico 4.6** Curvas de diferencias integrales.  
(Fuente: IDEAM 1997)

sual, manteniéndose la condición de fase húmeda, que en los últimos años presenta una tendencia al descenso.

En la estación Salado Blanco, se observa la misma fase de humedad, pero con su estabilidad afectada por períodos de descenso marcados en 1978-1982 y 1988-1994 (*gráfico 4.5*), que se debe al régimen pluviométrico de esta zona, distinto al de Cascada Simón Bolívar. En la estación Pericongo se mantiene una situación similar a la descrita, pero con su mayor intensidad de descenso desde 1991, lo cual está directamente relacionado con los efectos hidrológicos del Fenómeno Cálido del Pacífico (El Niño). Por otra parte, la diferencia de las variaciones y tendencias corresponden a dos regímenes climáticos diferentes: Cascada Simón Bolívar, con influencia del régimen climático amazónico, y aguas abajo, por el régimen propio de la cuenca del Magdalena.

Para las estaciones Puente Balseadero (aguas arriba del embalse Betania) y Puente Santander (Neiva), el compor-

7 Transformación de la serie histórica de caudales en la cual se considera la magnitud del promedio y la variabilidad multianual de la misma. Diferencia Integral=  $S(K-1)/Cv$ .



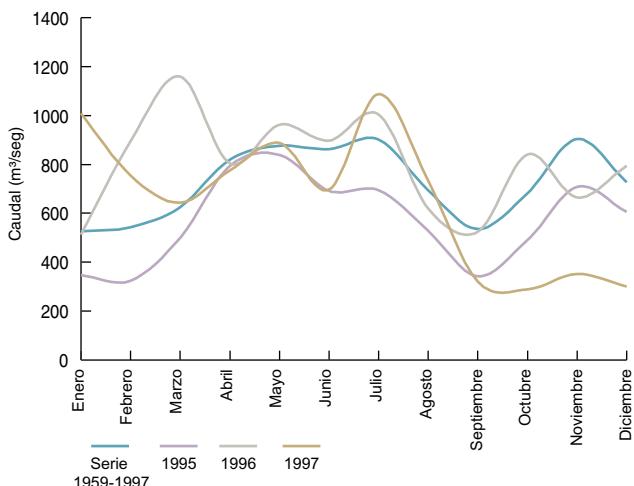
**Gráfico 4.7** Variación media mensual de caudales.  
Estación: Puente Balseadero - Magdalena  
(Fuente: IDEAM 1997)

tamiento de las fases de humedad es homogéneo (*gráfico 4.6*). En ellas se manifiestan dos períodos de descenso de humedad: el primero entre 1979 y 1982, y otro más intenso que comienza en 1992, para el primer descenso, y en 1991, para el segundo; correspondiéndose igualmente con la ocurrencia de fenómenos cálidos del Pacífico.

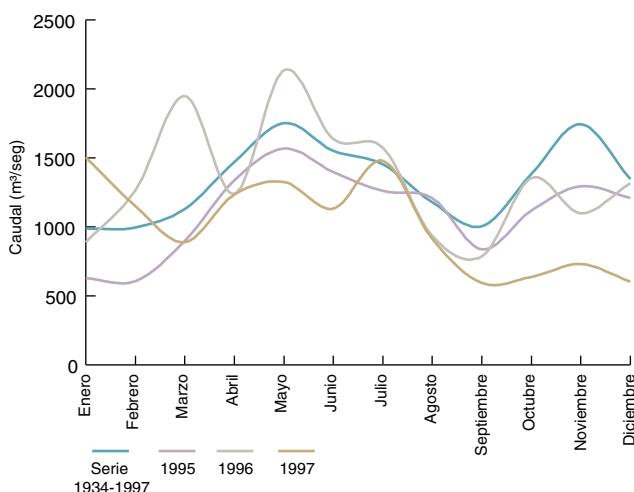
Purificación y Arrancaplumas –entre los municipios de Girardot y Honda–, al parecer forman un sector homogéneo en cuanto a los ciclos de alta y baja humedad (*gráfico 4.6*). Además de los dos períodos de descenso habituales para las estaciones aguas arriba, existe un tercer período de descenso que se registra desde mediados de 1987 hasta finales de 1988. Esto último obedece a los efectos de regulación del embalse de Betania.

En la estación de Puente Balseadero, el hidrograma mensual multianual de la serie de caudales manifiesta una amplitud de oscilación de  $226 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un coeficiente de variación  $C_v = 0,31$ . En el régimen 1995 a 1997, se evidencia un comportamiento atípico en su distribución mensua: el mayor coeficiente de variación corresponde a 1997, año durante el cual la amplitud de oscilación alcanzó los  $342 \text{ m}^3/\text{s}$ , con el máximo en julio, superando en 18% el promedio mensual multianual, y un mínimo en diciembre, con reducción de 44% del promedio mensual multianual (*gráfico 4.7*), por los efectos acumulados sobre el recurso hídrico por causa del Fenómeno Cálido del Pacífico. Se destaca como el menor volumen anual acumulado para los últimos 31 años de registro, el correspondiente a 1995, con una disminución promedio de 25%.

Los hidrogramas mensuales multianuales de las estaciones aguas abajo –Purificación y Arrancaplumas– tienen amplitudes de variación de  $379 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $763 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente, con fluctuaciones de mes a mes cerca-



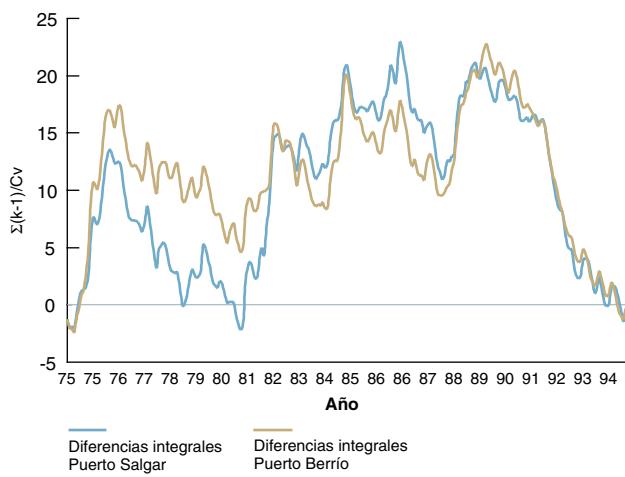
**Gráfico 4.8** Variación media mensual de caudales.  
Estación: Purificación - Magdalena  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.9** Variación media mensual de caudales.  
Estación: Arrancaplumas - Magdalena  
(Fuente: IDEAM 1997)

nas al promedio del año (coeficiente de variación  $C_v = 0,20$ ). Los años 1995 y 1997 presentaron reducciones promedio mensuales entre 8% y 22%, con una alta variabilidad en su distribución a lo largo del año (*gráficos 4.8 y 4.9*). Los valores mensuales menores registrados corresponden al período entre octubre y diciembre de 1997, como consecuencia de los efectos hidrológicos del Fenómeno Cálido del Pacífico.

En la cuenca del Medio Magdalena, el régimen general de las estaciones de Puerto Salgar y Puerto Berrío manifiesta un comportamiento similar al último sector del Alto Magdalena, pero con una atenuación del período de descenso de humedad a mediados de 1988, atribuible a aportes importantes de ríos como el Saldaña, Sumapaz, Prado, Combeima y Bogotá, entre otros; la tendencia final de la serie es de descenso (*gráfico 4.10*).



**Gráfica 4.10** Curvas de diferencias integrales.

(Fuente: IDEAM 1997)

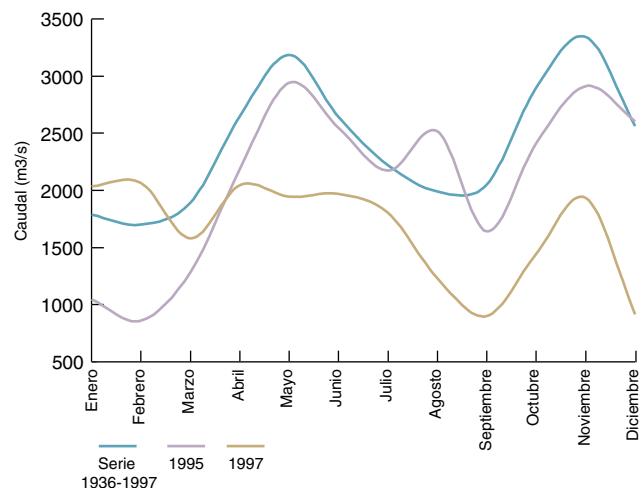
El hidrograma mensual multianual de la serie para los últimos 20 años presenta una amplitud de variación de 944 m<sup>3</sup>/s y un coeficiente de variación de 0.22.

En cuanto al régimen para 1995-1997, el comportamiento de los caudales registrados en la estación de Puerto Berrío manifiesta una condición de reducción que varía entre el 8% y el 50% para 1995, con respecto al hidrograma medio mensual multianual (*gráfico 4.11*). En 1997 se registraron altos caudales para enero y febrero, cambiando a un régimen con reducciones del 10% al 50% para el resto del año, con respecto a los caudales medios mensuales multianuales.

Para el análisis en el Bajo Magdalena se evaluaron las estaciones Sitio Nuevo, Peñoncito, Reginor (abajo de la población La Gloria) y Calamar. El comportamiento del régimen general, en cuanto a ciclos de humedad de los últimos 20 años, es el más heterogéneo del río en todo su recorrido (*gráfico 4.12*); esto señala con claridad las distintas condiciones que conforman el recurso hídrico para este sector. En Sitio Nuevo, aguas abajo de Puerto Berrío, se tiene un cambio brusco de fase, seguramente a causa del aporte de grandes afluentes, en particular del río Sogamoso con caudales significativos, y un comportamiento hidrológico diferente que se manifiesta en esta parte del río Magdalena.

En Peñoncito se registra una fase de humedad con una fuerte tendencia a la disminución, que comienza en 1984 y alcanza su máximo descenso en 1988, experimentando luego una pequeña recuperación, para continuar en 1991 con la tendencia de descenso.

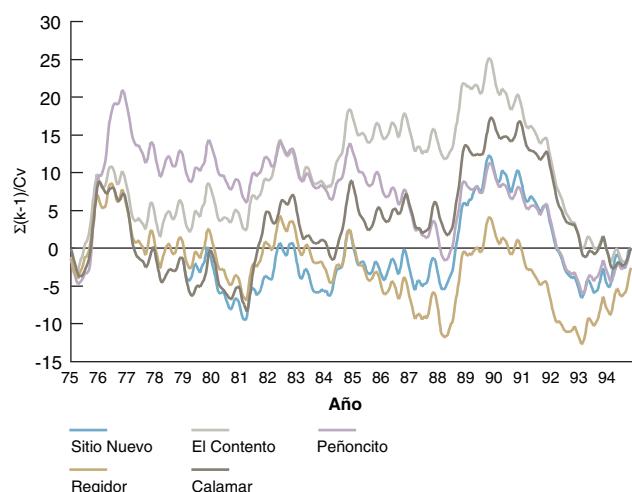
Con respecto a la tendencia de los caudales de las estaciones del Medio Magdalena, se denota una reducción de la duración de la fase húmeda, lo cual propicia la aparición de un ciclo de baja humedad en la estación de Reginor. Este comportamiento atípico está condiciona-



**Gráfica 4.11** Variación media mensual de caudales.

Estación: Puerto Berrío - Magdalena

(Fuente: IDEAM 1997)

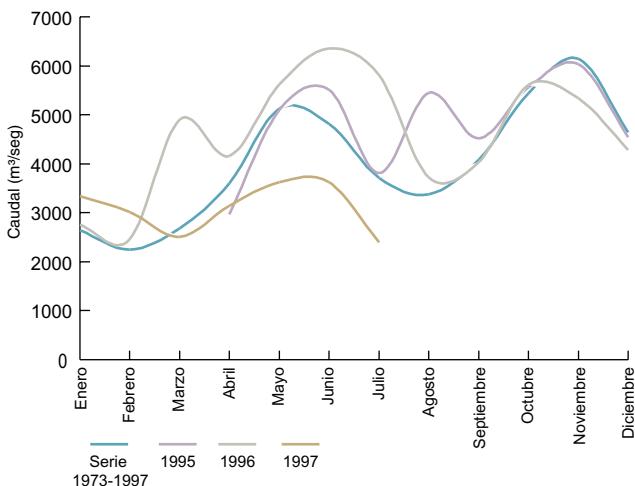


**Gráfica 4.12** Curvas de diferencias integrales.

(Fuente: IDEAM 1997)

do por la interacción con el sistema cenagoso, que determina un intercambio hidrodinámico complejo para el sistema río-ciénagas-río (*gráfico 4.12*). Sin embargo, en El Contento, estación localizada después de la bifurcación del brazo Morales, se experimenta una recuperación del régimen que nuevamente varía en Reginor, después de la entrada del mismo brazo.

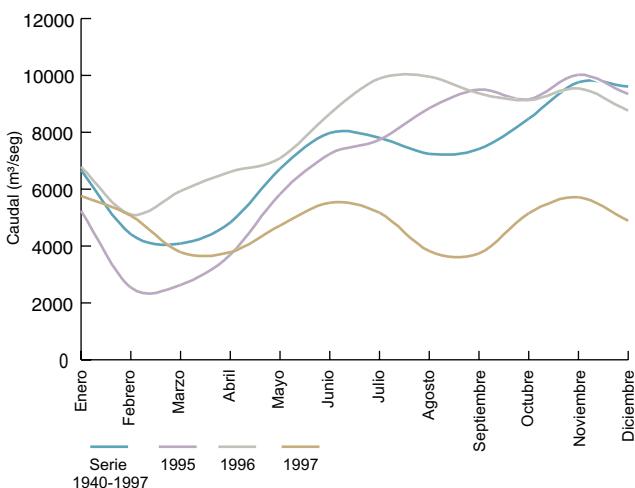
En Calamar aparece un ciclo húmedo totalmente desfasado con las tendencias de las estaciones Peñoncito y Reginor, manifestando la restitución del régimen propio del Magdalena. Al evaluar el hidrograma multianual de caudales medios mensuales de las estaciones del Bajo Magdalena, se identifica en Reginor una amplitud de 3.900 m<sup>3</sup>/s (*gráfico 4.13*) y en Calamar de 5.690 m<sup>3</sup>/s (*gráfico 4.14*), con coeficientes de variación de 0,30 y 0,26 respectivamente. Para el régimen 1995-1997, la mayor reducción en el aporte de caudales medios men-



**Gráfica 4.13** Variación media mensual de caudales.

Estación: Regidor - Magdalena

(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.14** Variación media mensual de caudales.

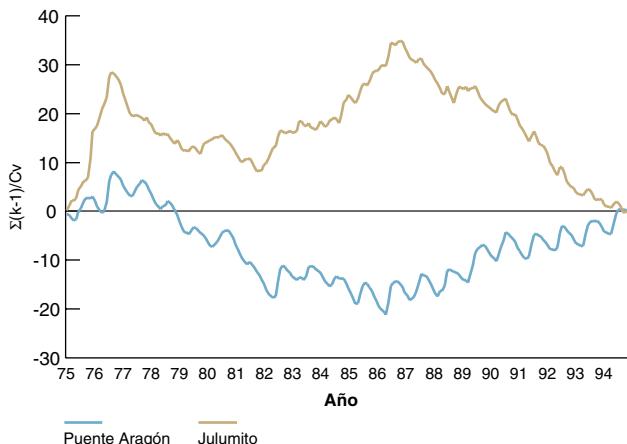
Estación: Calamar - Magdalena

(Fuente: IDEAM 1997)

suales se registró en 1997, cuando el coeficiente de variación fue 0,16, que representa estabilidad de los caudales bajos durante el año, en especial, para el segundo semestre, con reducciones superiores a 40%.

A partir de las series históricas de caudales analizadas a lo largo del Magdalena, se concluye que existen zonas de homogeneidad en cuanto a fases de humedad se refiere. Una de ellas se encuentra en la parte alta, marca su régimen hasta la estación Pericongo y se caracteriza por tener un ciclo de alta humedad con gran variabilidad y atenuaciones graduales, que forman la transición a la segunda zona. Otra zona está claramente definida desde Puente Balseadero hasta Puerto Berrio y presenta fases de alta humedad bien estables.

Los caudales de la estación hidrológica de Sitio Nuevo muestran las fases de humedad más variables, mani-



**Gráfica 4.15** Curvas de diferencias integrales.

(Fuente: IDEAM 1997)

festando la complejidad del régimen hidrológico que predomina en esta parte del río.

## Río Cauca

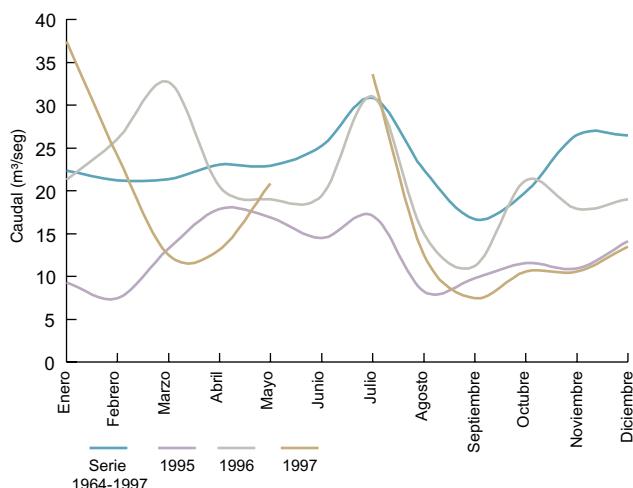
Es el principal afluente del río Magdalena, atraviesa el valle interandino formado por las cordilleras Occidental y Central, recorriendo el país en forma paralela a la cuenca del río Magdalena, y vierte sus aguas al mar Caribe a través del río Magdalena.

La primera estación considerada para el análisis del régimen general del río Cauca es Puente Aragón, en donde la fase de humedad es contraria a la que registra el Magdalena en su nacimiento (*gráfico 4.15*). Se establece un ciclo de baja humedad, predominante en los últimos 20 años, pero con tendencia al ascenso desde 1994.

A partir de la estación Julumito (Popayán), la condición predominante es de alta humedad, con un régimen y configuración estables; es claro un descenso hasta 1981, el cual también se manifiesta en muchas de las estaciones consideradas para el río Magdalena.

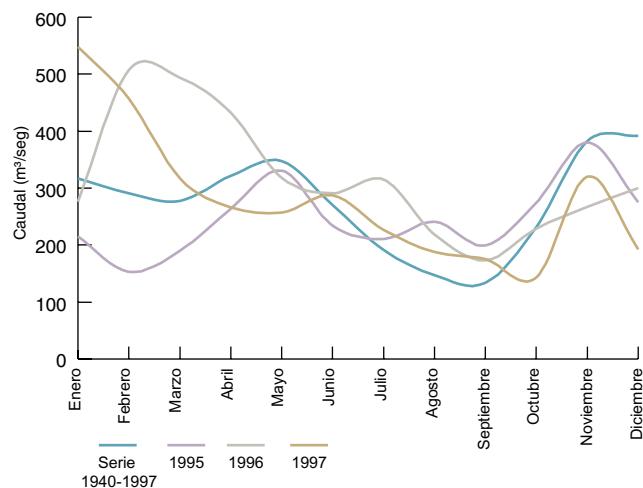
El comportamiento hidrológico multianual está definido por una alta estabilidad ( $C_v = 0,16$ ) y valores mensuales cercanos al promedio ( $23 \text{ m}^3/\text{s}$ ), con una amplitud para el hidrograma multianual de  $14 \text{ m}^3/\text{s}$  (*gráfico 4.16*). Contrario a esto, el régimen 1995-1997 presenta una alta variabilidad ( $C_v$  de 0,28 a 0,56), siendo 1997 el año más crítico, en el cual la amplitud de variación alcanza  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , registrando el máximo en enero y el mínimo en septiembre, con un promedio de reducción anual en los caudales de 27%.

Para el Medio y Bajo Cauca, el régimen general presenta una fase de humedad bien demarcada en las estaciones Juanchito, La Victoria, La Pintada, Bolombolo, Puerto Valdivia y Apavi (*gráfico 4.17*). En éstas se defi-



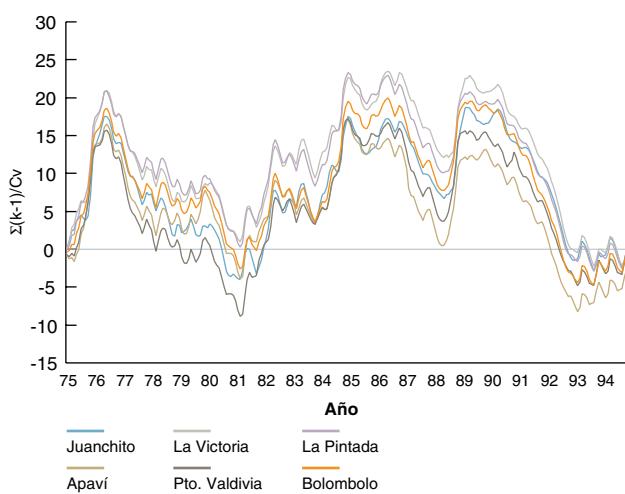
**Gráfica 4.16** Variación media mensual de caudales.

Estación: Julumito - Cauca  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.18** Variación media mensual de caudales.

Estación: Juanchito - Cauca  
(Fuente: IDEAM 1997)

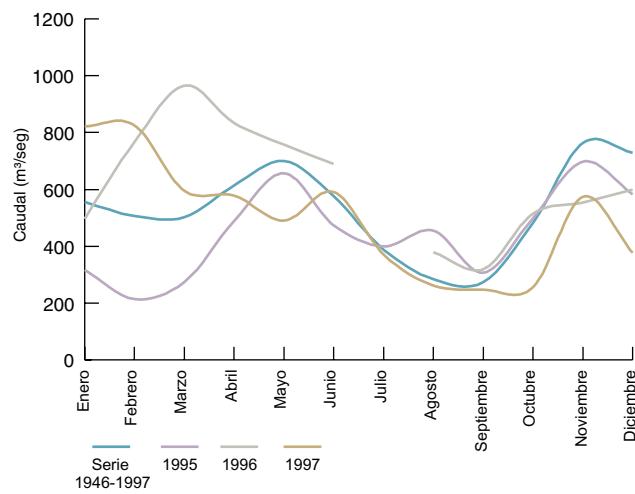


**Gráfica 4.17** Curvas de diferencias integrales.  
(Fuente: IDEAM 1997)

nen claramente descensos significativos, que alcanzan las mayores magnitudes en 1981 y 1988. A partir de 1992 se evidencia una tendencia descendente, que coincide con los períodos del Fenómeno Cálido del Pacífico.

Con relación al régimen para 1995-1997, los caudales de las estaciones Juanchito y La Virginia presentan variabilidad similar ( $C_v$  entre 0,25 y 0,42), con las más altas variaciones en 1997 (gráficos 4.18 y 4.19). Los mayores porcentajes de reducción, en la escala mensual respecto al promedio multianual, se presentaron en el último trimestre de 1997, alcanzando en diciembre hasta el 50% en la estación Juanchito, a causa de los efectos del Fenómeno Cálido del Pacífico sobre la hidrología de esta región.

En Puerto Valdivia la tendencia del comportamiento hidrológico es similar a las dos estaciones anteriores, pero



**Gráfica 4.19** Variación media mensual de caudales.

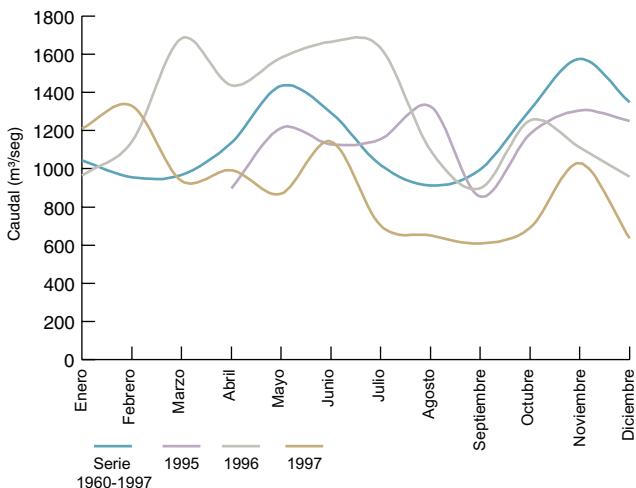
Estación: La Virginia - Cauca  
(Fuente: IDEAM 1997)

el orden de magnitud de los coeficientes de variación es menor (gráfico 4.20), indicando un déficit estable (con respecto al hidrograma medio mensual multianual), que alcanza en promedio anual de 22%.

Finalmente, en la estación Las Varas (gráfico 4.21) se manifiesta un comportamiento atípico, con la menor variabilidad ( $C_v=0,18$ ) en 1997 y reducción de caudales superior al 12%, con relación al promedio multianual.

## Río Sinú

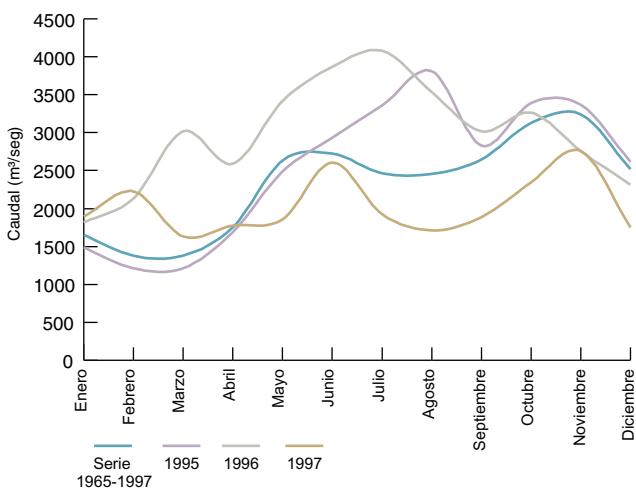
En el régimen general del río Sinú se observan dos zonas homogéneas: en la primera, con el análisis de los caudales de las estaciones La Despensa y Angostura de Urrá, se identifica una fase de alta humedad para los últimos 20 años; en este periodo no se manifiestan descensos signifi-



**Gráfica 4.20** Variación media mensual de caudales.

Estación: Puerto Valdivia - Cauca

(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.21** Variación media mensual de caudales.

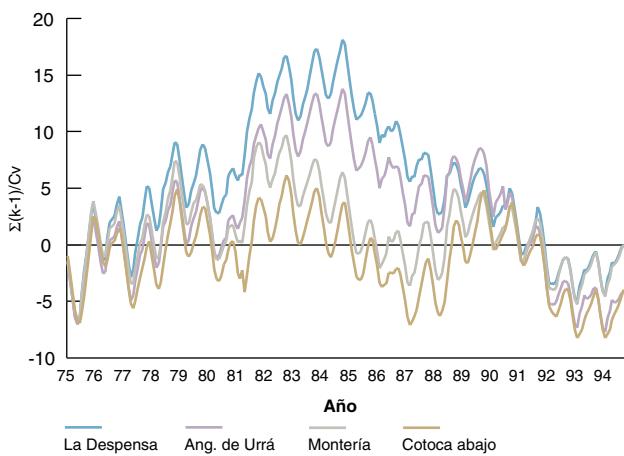
Estación: Las Varas - Cauca

(Fuente: IDEAM 1997)

ficitivos. La tendencia final es descendente, más acen-tuada en Angostura de Urrá (*gráfico 4.22*).

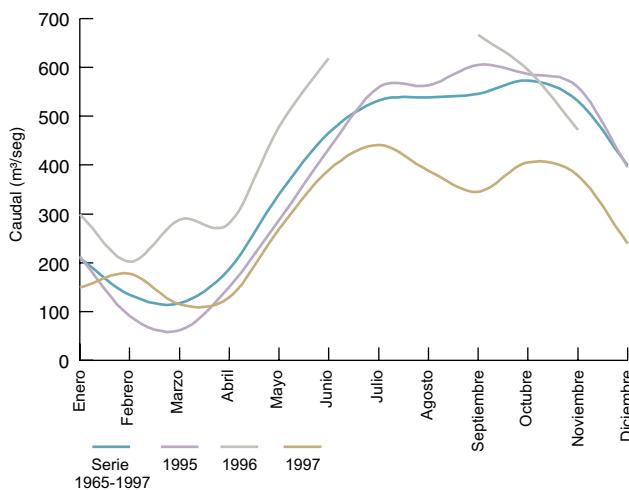
Para la segunda zona, que incluye las estaciones de Montería y Cotoca Abajo, las fases de humedad son difusas, aunque en la estación Montería la fase de alta humedad es más clara. Las curvas de diferencias integrales durante los últimos 20 años se han mantenido alrededor de las condiciones normales, sin evidenciar un claro es-tado de la fase de alta o de baja humedad; esto es un reflejo del cambio de comportamiento que sufre el río al pasar del régimen torrencial al régimen de planicie y por la influencia de la zona cenagosa, que afecta de manera apreciable en la estación Cotoca Abajo, con el efecto de amortiguación natural.

El régimen para 1995-1997 se caracteriza por caudales cercanos a los promedios para 1996 y por una reduc-



**Gráfica 4.22** Curvas de diferencias integrales.

(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.23** Variación media mensual de caudales. Estación:

Cotoca Abajo - Sinú

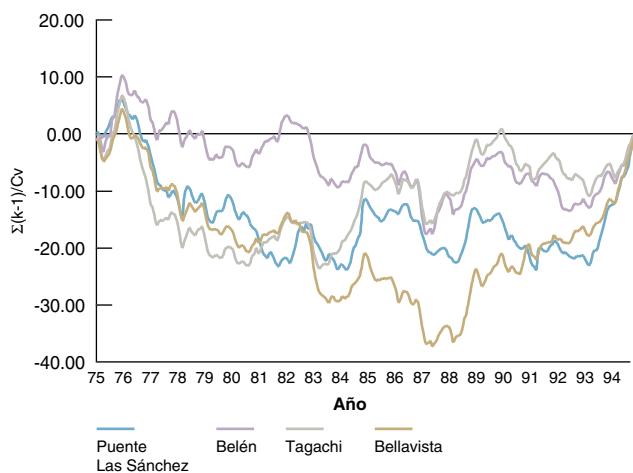
(Fuente: IDEAM 1997)

ción de caudales que supera el 22%, con respecto al pro-medio multianual. Para los tres años, la variabilidad se mantiene cercana a la del hidrograma medio mensual multianual (*gráfico 4.23*).

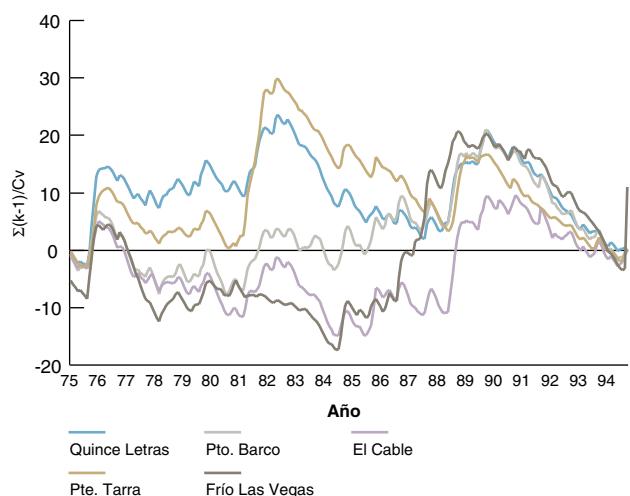
## Río Atrato

El régimen general del río Atrato durante los últimos 20 años muestra una fase de baja humedad, que se identifica claramente en las estaciones Tagachí, Belén, Puente Las Sánchez y Bellavista. En Tagachí, la tendencia sugiere una permanencia en la fase de baja humedad, con re-cuperación en los últimos años (*gráfico 4.24*).

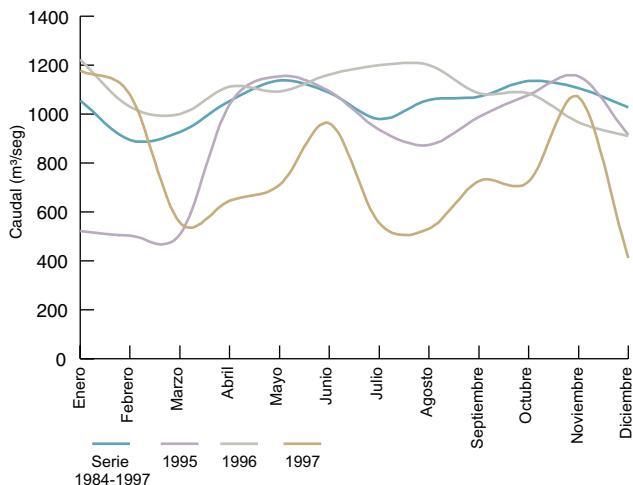
La serie histórica en la estación Quibdó muestra una pequeña variabilidad mensual ( $C_v=0,16$ ). Para los últi-mos tres años, la amplitud de oscilación tiene un reduci-



**Gráfica 4.24** Curvas de diferencias integrales.  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.26** Curvas de diferencias integrales.  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.25** Variación media mensual de caudales.  
Estación: Quibdó - Atrato  
(Fuente: IDEAM 1997)

do rango de variación (3% a 9%), manteniéndose muy cerca de la amplitud multianual (*gráfico 4.25*). Al analizar el régimen para 1995-1997, llama la atención el comportamiento mensual de los caudales durante 1996, con una variabilidad muy baja ( $C_v=0,08$ ). Finalmente, para el primer semestre de 1997 se mantiene una reducción, a excepción de enero y febrero, meses que presentan valores de caudal 40% y 60% por encima del promedio mensual multianual de la estación.

## Río Catatumbo

El régimen general de este río tiene muchas particularidades: en la parte alta de la cuenca, a la altura de la estación Quince Letras, se reflejan unas condiciones de alta humedad que no son características para la cuenca (*gráfico 4.26*). Para la estación El Cable, se registra un com-

portamiento en el que claramente se diferencian dos fases: la primera, de baja humedad, que cubre de 1975 a 1988, y la segunda, de alta humedad hasta 1994, año a partir del cual se nota una tendencia al descenso.

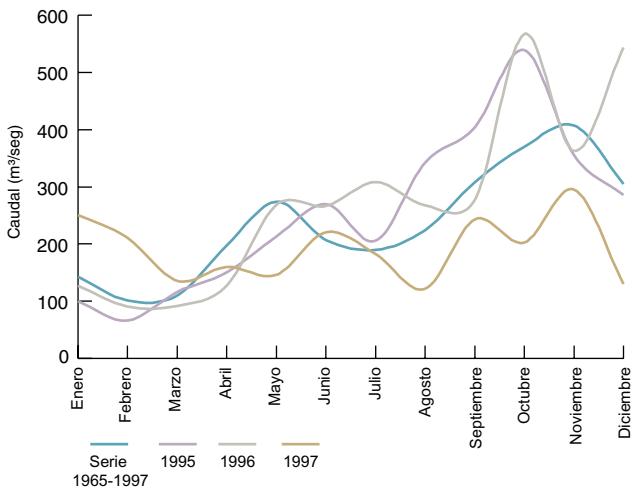
En el caso de los caudales en la estación Puerto Barco, tienen un comportamiento similar con la misma respuesta hidrológica descrita para la estación anterior, aunque con períodos de menor longitud para cada una de las fases.

Con relación al régimen para 1995-1997, en el comportamiento mensual de los caudales se destaca la reducción de la amplitud de variación en un 30%, con respecto a la evaluada para los últimos 30 años en la estación Puerto Barco (*gráfico 4.27*). La variabilidad intermensual es alta para los últimos tres años ( $C_v$  de 0,29 a 0,58). Las condiciones de caudal excedente, que caracterizan los últimos meses de 1996, continúan vigentes en el primer trimestre de 1997 y luego presentan para diciembre una condición con un máximo de reducción superior a 50%.

## Ríos Patía y Mira

El análisis del régimen general del río Patía (*gráfico 4.28*) establece para la estación La Fonda, ubicada en la parte alta de la cuenca, un período corto de baja humedad desde 1976 hasta 1982, alternado con una fase de alta humedad hasta 1991, año a partir del cual comienza a manifestarse otra fase de baja humedad. Cabe resaltar la corta periodicidad de los ciclos, menor de diez años, reflejada en la serie.

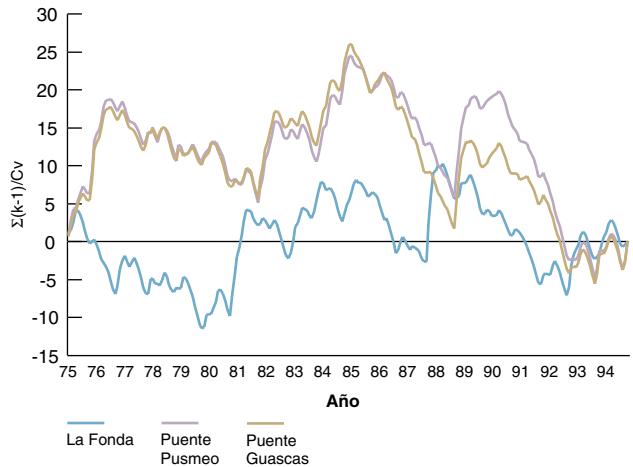
En el recorrido del río Patía, en la estación Puente Guascas, se establece una fase de alta humedad para los últimos 20 años, con los descensos característicos de 1981 y 1988-1989. La condición en fase de alta humedad para



**Gráfica 4.27** Variación media mensual de caudales.

Estación: Pto. Barco-Gabarra - Catatumbo

(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.28** Curvas de diferencias integrales.

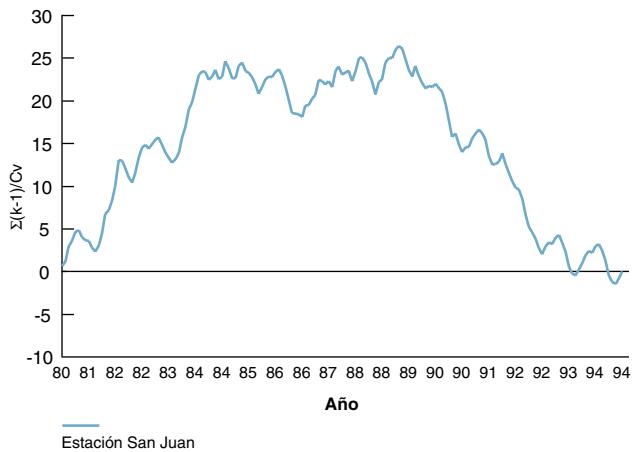
(Fuente: IDEAM 1997)

esta parte del río puede explicarse por el aporte del río Pasto, aunque en los últimos años se presenta una tendencia estable al descenso sin recuperación evidente.

En la estación Puente Pusmeo, localizada en la parte baja de la cuenca del río Patía, se mantiene el régimen característico de Puente Guascas. Los descensos típicos (1981 y 1988) también se manifiestan.

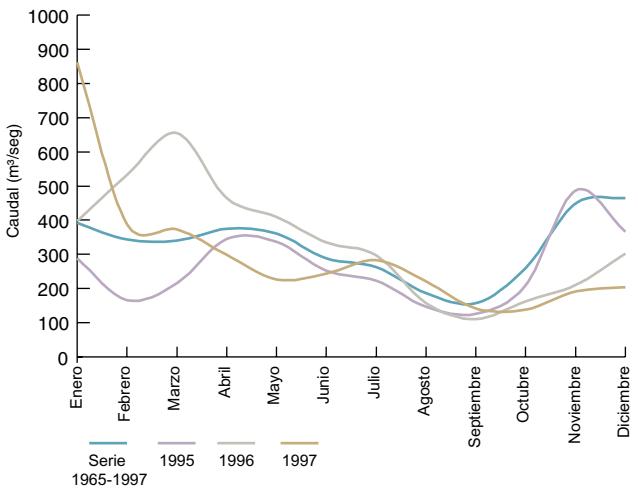
El río Mira, evaluado en la estación San Juan con registros desde 1980, tiene un comportamiento similar al de las cuencas media y baja del río Patía (*gráfico 4.29*).

El comportamiento hidrológico evaluado con la serie histórica de caudales en la estación Puente Pusmeo (*gráfico 4.30*) presenta una amplitud anual de  $464 \text{ m}^3/\text{s}$ , con una variabilidad  $C_v = 0,3$ . El régimen para 1995-1997 registra un aumento en la variabilidad intermensual de la serie ( $C_v$  de 0,4 a 0,65), con la mayor amplitud de oscilación de los caudales durante 1997, con valores que doblan la media



**Gráfica 4.29** Curvas de diferencias integrales.

(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.30** Variación media mensual de caudales.

Estación: Pte. Pusmeo - Patía

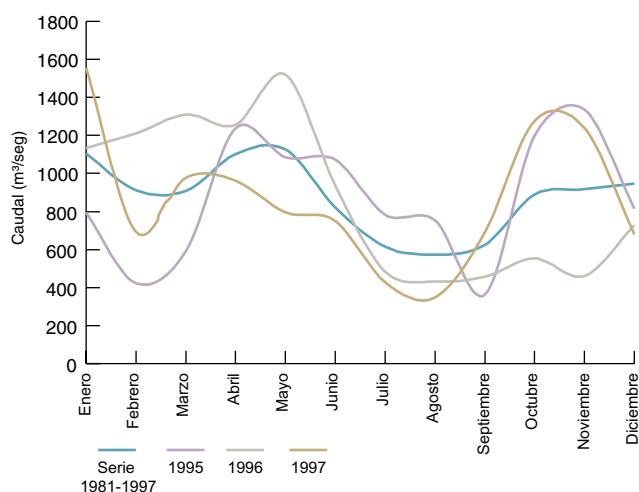
(Fuente: IDEAM 1997)

mensual multianual en enero y febrero, así como déficit significativo en el resto del año, que supera el 50% de reducción respecto al promedio mensual multianual.

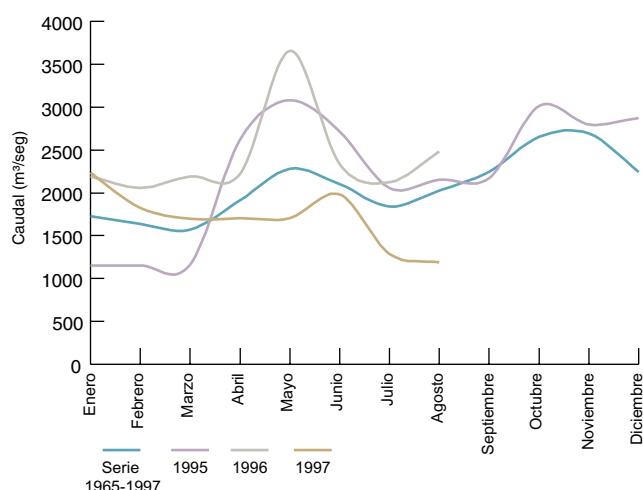
Para el río Mira, al considerar la estación San Juan, durante los últimos tres años se manifiesta un aumento en la variabilidad de la serie intermensual con coeficientes de variación de 0,36 a 0,46. Los promedios anuales se mantienen estables; sin embargo, existe una redistribución temporal del recurso, tal como lo demuestra la presencia de meses con exceso y meses con déficit. Esta situación favorece el aumento de la amplitud de oscilación del caudal, máxima en 1997 (*gráfico 4.31*).

## Río San Juan

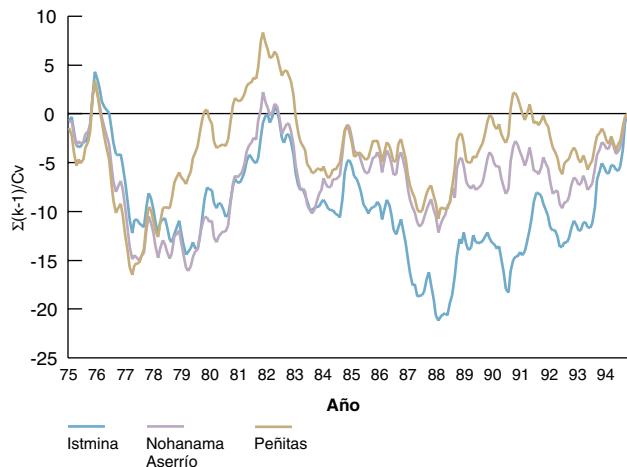
La evaluación de las condiciones del régimen general para el río San Juan se basa en los registros históricos de caudal



**Gráfica 4.31** Variación media mensual de caudales.  
Estación: San Juan - Mira  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.33** Variación media mensual de caudales.  
Estación: Peñitas - San Juan  
(Fuente: IDEAM 1997)



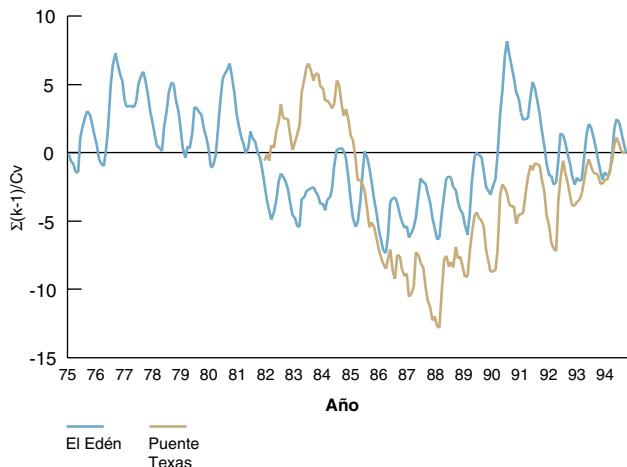
**Gráfica 4.32** Curvas de diferencias integrales.  
(Fuente: IDEAM 1997)

de los últimos 20 años en las estaciones Istmina, Nohamana Aserrío y Peñitas (*gráfico 4.32*). Éstas presentan un comportamiento homogéneo que refleja una fase de baja humedad. Se registran aumentos temporales de humedad en 1976 y 1982. La tendencia final de la serie es de ascenso.

La serie histórica de caudales en la estación Peñitas presenta una amplitud de oscilación de los caudales de  $2.080 \text{ m}^3/\text{s}$ , mayor que la registrada en 1997, cuando se redujo el aporte de caudal en un 17% respecto al promedio de la serie histórica. En cuanto a variabilidad se refiere, el mayor coeficiente de variación ( $C_v=0,30$ ) corresponde a 1996 (*gráfico 4.33*).

## Río Putumayo

El régimen general del río Putumayo, que pertenece a la vertiente del Amazonas, manifiesta en la estación El Edén

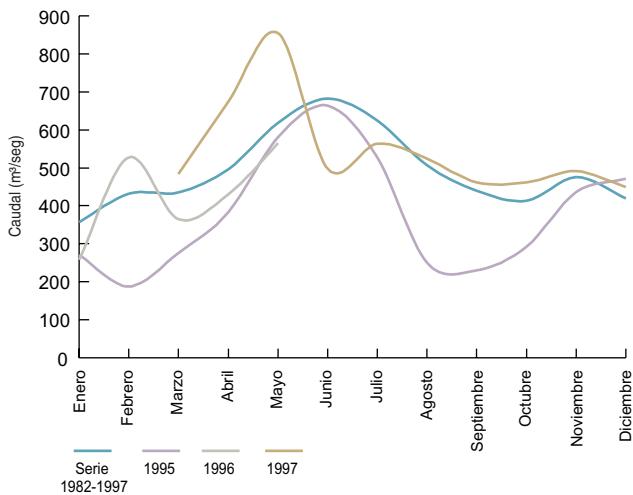


**Gráfica 4.34** Curvas de diferencias integrales.  
(Fuente: IDEAM 1997)

una alternancia de fases de alta y baja humedad con períodos muy cortos, entre seis y ocho años (*gráfico 4.34*).

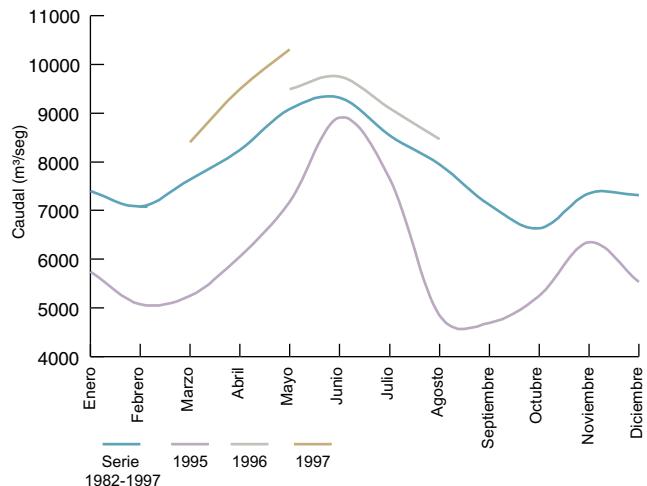
En Puente Texas, los caudales se comportan bajo dos fases: la primera, de alta humedad, con un período corto de ocho años, y otra, de baja humedad, que cubre un mayor período de tiempo. En esta segunda fase se presenta un ascenso estable para los últimos cinco años.

Según el hidrograma medio mensual multianual de los últimos 12 años de registro de la estación Puente Texas, la amplitud de oscilación característica de los caudales es  $680 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un coeficiente de variación intermensual de 0,2 (*gráfico 4.35*). Para el régimen 1995-1997 es característica una reducción del 3% en la amplitud de oscilación, con una duplicación del coeficiente de variación intermensual con respecto al promedio mensual multianual (*gráfico 4.36*).



**Gráfica 4.35** Variación media mensual de caudales.

Estación: Pte. Texas - Putumayo  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.36** Variación media mensual de caudales.

Estación: Tarapaca - Putumayo  
(Fuente: IDEAM 1997)

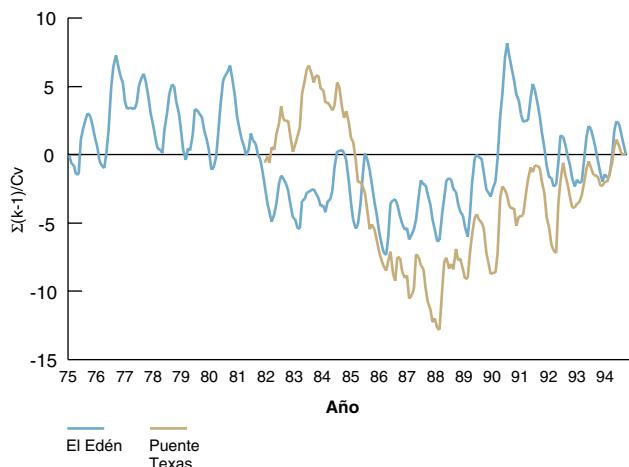
## Río Meta

Al evaluar las condiciones del régimen general en el río Meta (*gráfico 4.37*), que drena al Orinoco, la estación Puerto Texas evidencia su condición generalizada en fase de baja humedad, con magnitud leve, durante los últimos 20 años de registro de caudales en esta estación. Se identifican como descensos acentuados 1982 y 1993, siendo éste último más drástico.

El comportamiento de la estación Cabuyaro está en contrafase con la de Puerto Texas, manifestándose de esta forma la entrada del río Guatiquía; la fase predominante es de alta humedad, con tendencia descendente desde 1990. Situación similar se manifiesta en la estación Puerto Texas, donde se refleja la influencia reguladora de los embalses de Chivor, Guavio y la laguna de Tota; para esta estación la tendencia descendente sólo se evidencia a partir de 1992.

Finalmente en la estación Aceitico, en la parte baja de la cuenca, el río registra una condición más estable en la fase de humedad alta, predominante entre 1982 y 1992, para ingresar luego a una fase de baja humedad con ligera recuperación desde 1994 en adelante.

La variación de caudales a escala mensual para el régimen 1995-1997 se evalúa en forma comparativa con el hidrograma mensual multianual de las estaciones Puente Lleras y Aceitico, con 25 y 14 años de registro respectivos (*gráficos 4.38 y 4.39*). Si bien la amplitud de oscilación de los caudales no fluctúa en más de la décima parte del promedio multianual, en Puente Lleras los caudales experimentan reducción, en especial en 1995, y en los dos años restantes presentan recuperación hacia las condiciones promedias del caudal, en tanto que en Aceitico la condición de reducción es generalizada para los últi-



**Gráfica 4.37** Curvas de diferencias integrales.

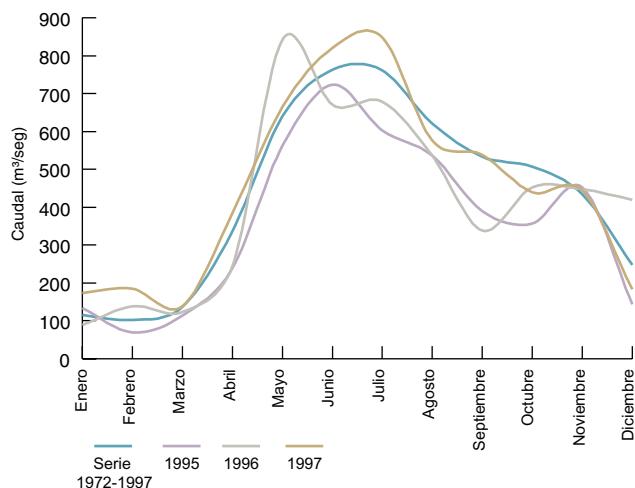
(Fuente: IDEAM 1997)

mos tres años. La variabilidad en el nivel intermensual es alta, con coeficientes de variación de 0,56 y 0,67 en Puente Lleras y Aceitico.

## Comportamiento de los niveles durante 1995-1997

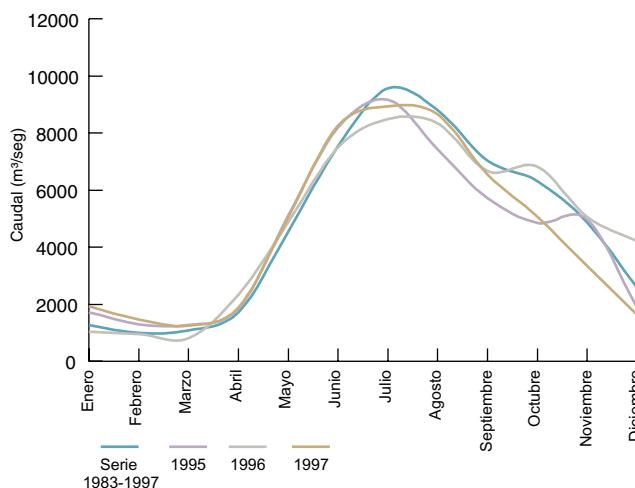
Las condiciones características de los niveles en los ríos se evalúan con relación a las posibilidades o limitantes para la navegación. En la parte media y baja de la cuenca del río Magdalena, debido a la presencia de embarcaciones de gran calado, se hace énfasis en la determinación de niveles bajos, pues éstos reducen el potencial navegable del río.

Los problemas de navegación se hacen críticos cuando los niveles son inferiores al nivel mínimo de navega-



**Gráfica 4.38** Variación media mensual de caudales.

Estación: Pte. Lleras - Meta  
(Fuente: IDEAM 1997)



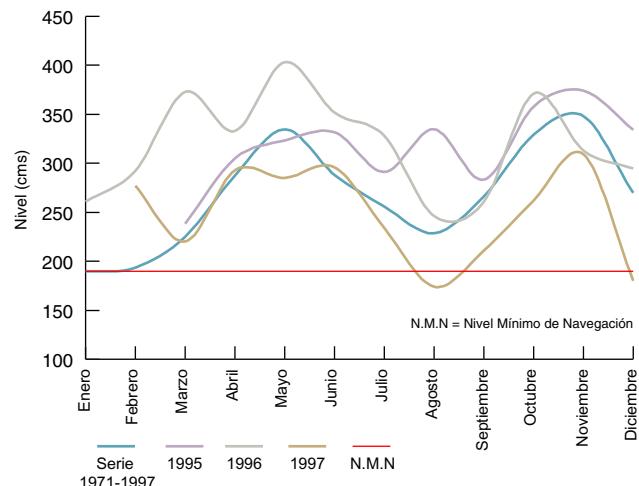
**Gráfica 4.39** Variación media mensual de caudales.

Estación: Aceitico - Meta  
(Fuente: IDEAM 1997)

ción, determinado por medio del análisis de frecuencia de niveles en los tramos navegables de los ríos. El nivel mínimo de navegación se define como el nivel igual o mayor durante el 95% del tiempo, incrementado para calado promedio mínimo de tres pies (91 cm); es decir que, en un año, solamente 18 días podría estar con un nivel inferior. Este nivel sirve de referencia para determinar la profundidad mínima disponible útil para la navegación fluvial.

En particular se consideran los ríos Magdalena y Cauca, con las estaciones de El Banco, Barrancabermeja, Calamar, Las Varas, y el canal del Dique, con la estación Incora km7. En los ríos Atrato, Meta y Putumayo se evalúan las estaciones Quibdó, Aceitico y Puente Texas.

Al evaluar los niveles mínimos de navegación se observó que en el Medio Magdalena, exactamente en la



**Gráfica 4.40** Variación media mensual de niveles.

Estación: Barrancabermeja - Magdalena  
(Fuente: IDEAM 1997)

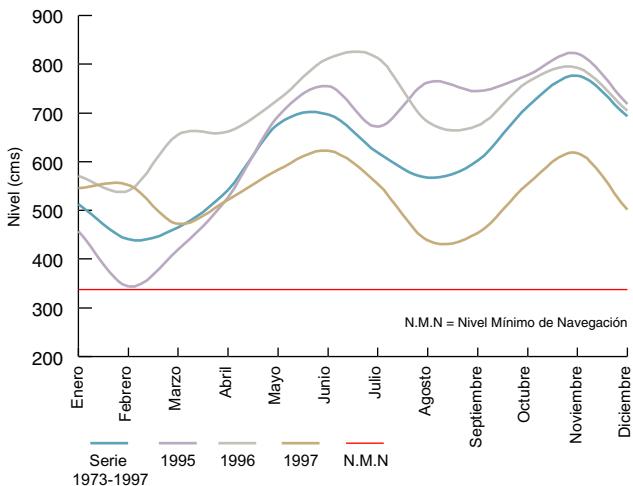
estación Barrancabermeja (*gráfico 4.40*), durante 1995 se manifestaron restricciones en calado durante los tres primeros meses del año. En el río Cauca, la estación Las Varas reflejó una situación similar.

En las estaciones del Bajo Magdalena, los niveles registrados durante 1995 mostraron una gran fluctuación durante el año: entre febrero y marzo se presentaron los valores mínimos del periodo analizado, y de allí en adelante el incremento fue continuo durante todo el año, alcanzando su valor máximo –muy por encima del valor multianual– en noviembre en las estaciones de El Banco y Calamar y en agosto, en la estación de Las Varas en el río Cauca (*gráficos 4.41 a 4.43*). En promedio, los valores de 1995 estuvieron por encima de la media en las tres estaciones mencionadas, aunque para los tres primeros meses del año hubo restricciones de la navegación.

1996 fue el año cuando se registraron los niveles más altos de los últimos 20 años: los valores mensuales siempre estuvieron por encima de los promedios históricos, alcanzando sus máximos valores en julio y agosto, tanto en el Medio como en el Bajo Magdalena. Representó un año sin problemas mayores para la navegación.

En contraste con 1996, a consecuencia del efecto del Fenómeno Cálido del Pacífico, en 1997 los niveles registraron, a partir del primer trimestre, valores muy inferiores a los promedios multianuales y, con excepción de 1992, unos de los más bajos de los últimos 20 años. Estos niveles dificultaron la navegación, especialmente en los períodos más secos y en mayor incidencia en la parte media del río Magdalena y el canal del Dique (*gráfico 4.44*).

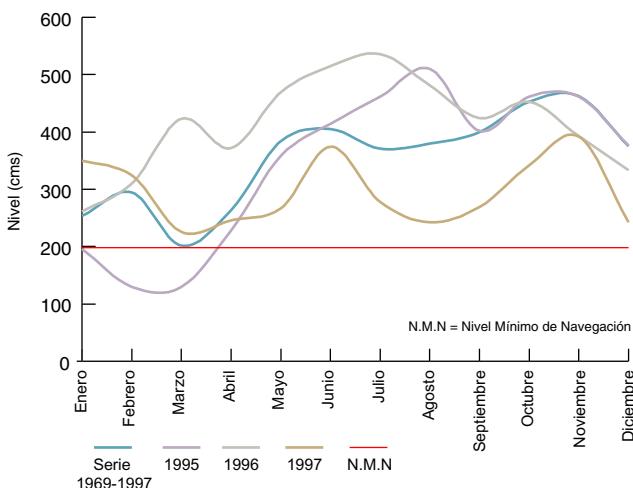
La variación de niveles en el río Atrato presentó para el primer trimestre de 1995 unos valores por debajo del



**Gráfica 4.41** Variación media mensual de niveles.

Estación: El Banco - Magdalena

(Fuente: IDEAM 1997)



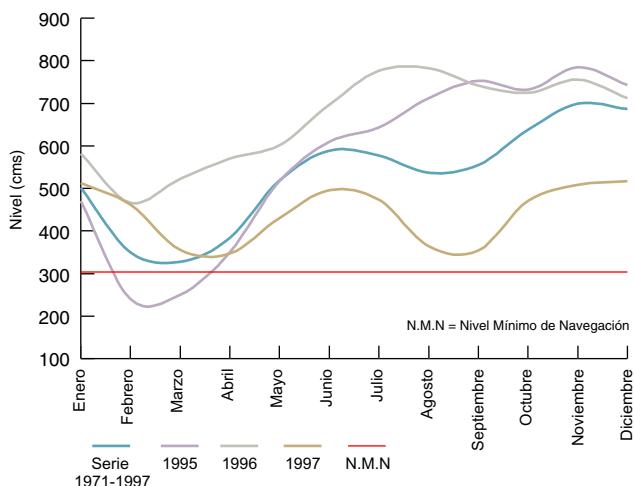
**Gráfica 4.42** Variación media mensual de niveles.

Estación: Las Varas - Cauca

(Fuente: IDEAM 1997)

nivel mínimo de navegación (2,30 m), llegando incluso a niveles de 1,84 m, para febrero, que dificultaron la navegación. En el resto del año los valores estuvieron por encima del nivel mínimo de navegación y se mantuvieron cercanos a la línea de la serie media multianual. En 1996 los niveles no produjeron inconvenientes para las embarcaciones porque se mantuvieron muy por encima de su valor mínimo.

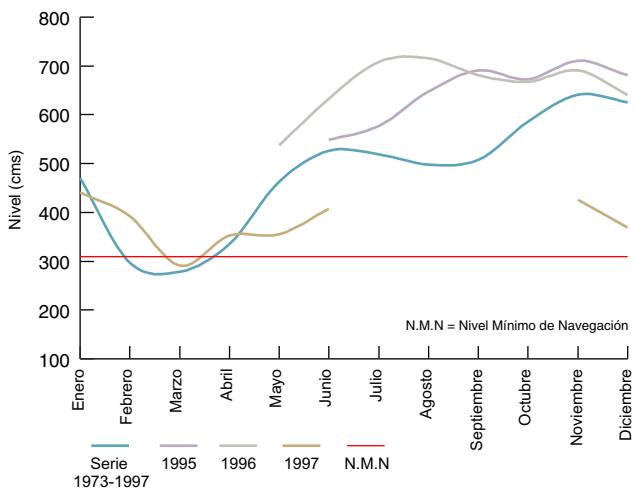
En 1997, debido a la incidencia del Fenómeno del Pacífico, se presentaron dos descensos por debajo del nivel mínimo de navegación: el primero, durante marzo y abril, con valores de hasta 1,99 m, y el segundo descenso, en julio y agosto, con valores que oscilaron entre 2,00 m y 2,03 m (gráfico 4.45), con problemas para la navegación cuando se colmataron los brazos que conforman la desembocadura en el golfo de Urabá.



**Gráfica 4.43** Variación media mensual de niveles.

Estación: Calamar - Magdalena

(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.44** Variación media mensual de niveles.

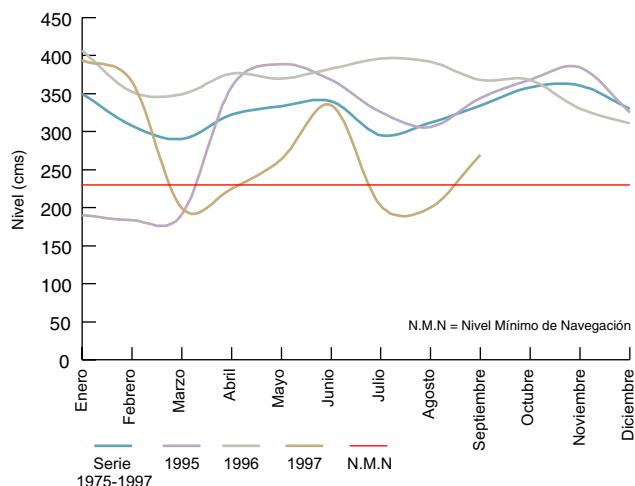
Estación: Incora K-7 - Canal del Dique

(Fuente: IDEAM 1997)

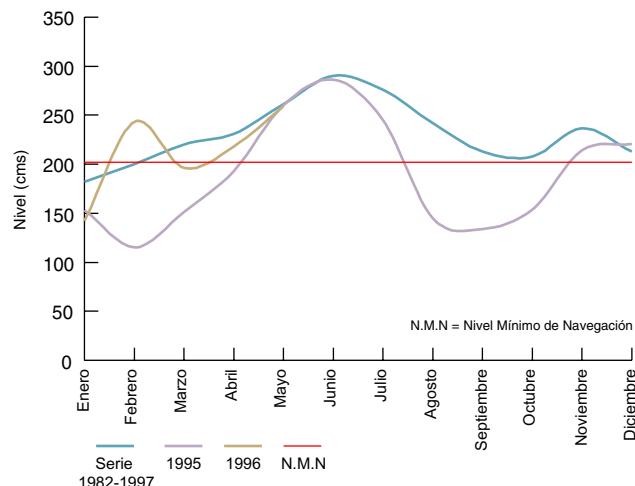
El río Meta en la estación Aceitico presentó durante los últimos tres años (1995-1997) un comportamiento similar al de la media multianual. Los valores se mantuvieron por debajo del nivel mínimo de navegación, correspondiente a 3,39 m, durante el primer trimestre de los tres años, situación usual en esta época del año.

En el resto del año hubo un aumento de los niveles que siguen la tendencia de la serie media de esta estación. Este comportamiento fue igual para los tres años, con una única diferencia en diciembre de 1997, cuando se observó un valor de 3,27 m, 12 cm por debajo del nivel mínimo de navegación, con restricciones para las embarcaciones (gráfico 4.46).

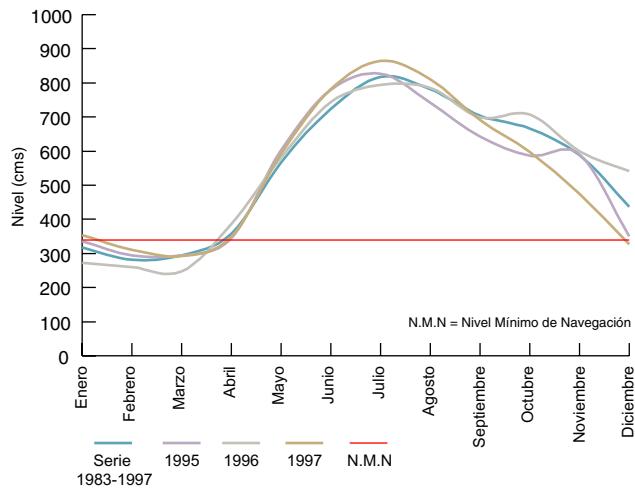
En la estación Puente Texas, sobre el río Putumayo, se observó una disminución de los niveles durante dos épocas de 1995: la primera, durante los primeros cuatro me-



**Gráfica 4.45** Variación media mensual de niveles.  
Estación: Quibdó - Atrato  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.47** Variación media mensual de niveles.  
Estación: Pte. Texas - Putumayo  
(Fuente: IDEAM 1997)



**Gráfica 4.46** Variación media mensual de niveles.  
Estación: Aceitico - Meta  
(Fuente: IDEAM 1997)

ses, con valores muy por debajo de la media multianual, entre 1.15 m y 1.93 m. Considerando que el nivel mínimo de navegación es de 2.02 m, se afectó el transporte fluvial en el río. La segunda disminución se presentó entre agosto y octubre, con el valor más bajo en septiembre, con 1.34 m. Para 1996 hay datos de los primeros cinco meses, siendo enero el único mes que presentó un nivel por debajo del mínimo de navegación (*gráfico 4.47*).

## Comportamiento general de los sedimentos

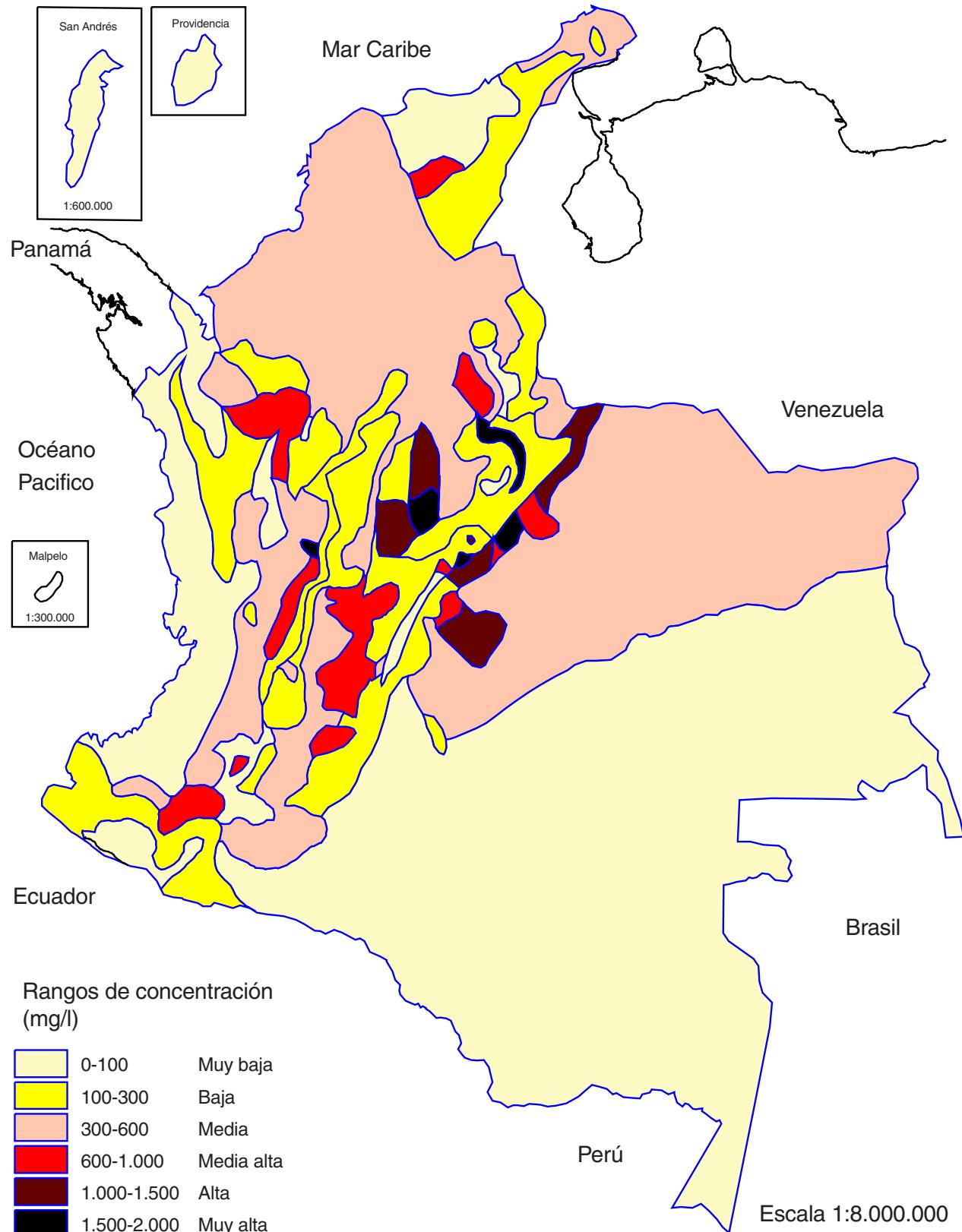
A causa del carácter erosivo de las corrientes de agua y de su capacidad de remover y transportar materiales sueltos procedentes de las superficies de los terrenos y de los

propios cauces, los ríos y los sistemas de drenaje tienen una significativa influencia en toda la geología y la geomorfología de las cuencas y la propia morfología de los cauces.

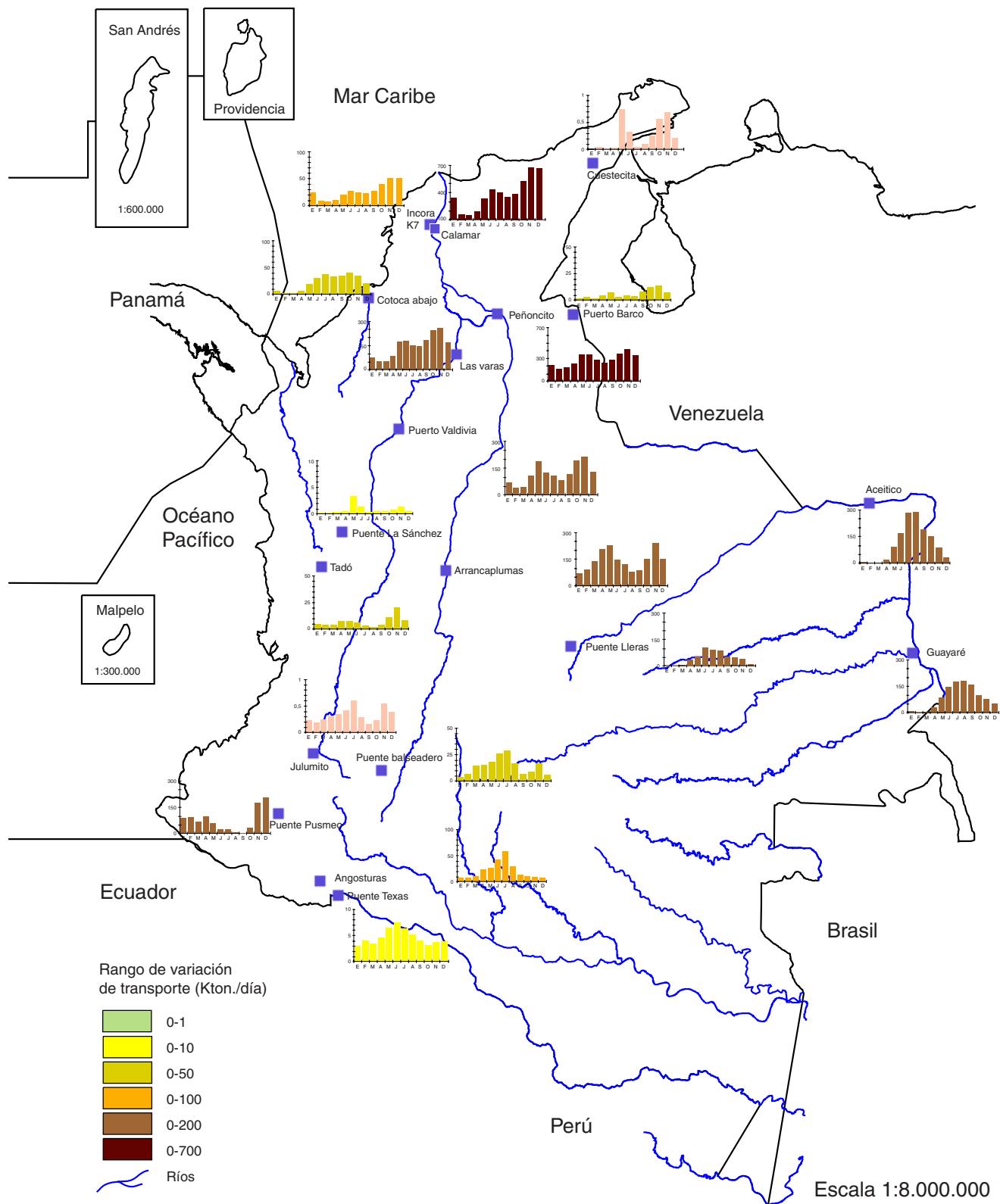
Parte de los sedimentos transportados por los ríos son una consecuencia natural de los procesos geológicos y de los fenómenos de erosión en los continentes. El resto de los sedimentos que transportan los ríos son producto antrópico y consecuencia del acelerado deterioro de las cuencas, debido al uso inadecuado de los suelos en la agricultura, a la explotación de minas, a la deforestación y a la construcción de obras de infraestructura.

En Colombia se calcula que cada año son transportados, en promedio, cerca de 300 Mt (megatoneladas,  $10^6$  toneladas) de sedimentos, que llegan a los océanos a través de todo el sistema hidrográfico nacional. El mayor aportante es el río Magdalena, con 130 Mt al mar Caribe.

La cuantificación de los sedimentos en suspensión presentes en los ríos colombianos se establece a través de mediciones en más de 300 estaciones, distribuidas en las principales corrientes del país, con un registro continuo superior a los 20 años en el 40% de los casos. La distribución espacial de la concentración de sedimentos constituye una aproximación al comportamiento morfológico y refleja en particular las condiciones de la zona Andina, que posee el mayor volumen y densidad de información. En el *mapa 4.7* se representan las zonas características para diferentes rangos de concentración de sedimentos en suspensión y en el *mapa 4.8* se muestran en forma general los patrones de distribución del transporte de sedimentos, registrados en estaciones localizadas sobre los principales ríos del país.



Mapa 4.7. Concentración de sedimentos en suspensión. (Fuente: IDEAM, 1998)



Concentración (mg/l)	Porcentaje de la superficie total del país
0 a 100	50,4
101 a 300	12
301 a 600	31,8
601 a 1.000	3,5
1.001 a 1.500	1,6
1.500 a más de 2.000	0,7

**Tabla 4.6.** Distribución porcentual de sedimentos en suspensión. (Fuente: IDEAM)

La descarga de sedimentos, especialmente en las corrientes de origen torrenciales, está relacionada con las intensidades de la lluvia en las cuencas, su cobertura vegetal y los usos del suelo en ellas. En la *tabla 4.6* se indican los porcentajes del territorio colombiano cubiertos por los diferentes rangos de concentración de sedimentos; se observa que más de la mitad del área del país presenta un promedio anual de 100 mg/litro.

Las concentraciones más altas corresponden a la zona Andina, donde se destacan áreas como la parte baja del río Chicamocha, la cuenca del río Minero y la zona alta del río Upía, en las cuales se alcanzan concentraciones mayores a 2.000 mg/l, representando menos del 1% del total del territorio nacional. En las zonas altas del piedemonte Llanero se observa que las concentraciones fluctúan entre 600 y 1.500 mg/l. Es importante anotar que las áreas de alta densidad boscosa, como la Amazonía y la vertiente del Pacífico, y las zonas de páramo presentan índices mínimos de concentración de sedimentos, entre 0 y 100 mg/l.

La concentración de sedimentos varía constantemente a lo largo de los cursos de agua. Las fluctuaciones puntuales dependen de un cierto número de parámetros, como son: las pendientes de los cauces; la velocidad del flujo; la turbulencia; el aporte de los afluentes y el aporte a las ciénagas, donde el sedimento se queda por colmatación; la formación de deltas, como en el caso de la zona baja del río Magdalena; las planicies de inundación, y la socavación y sedimentación de los cauces de los ríos, cuando se presenta una variación fuerte de sus secciones transversales. En el *mapa 4.8* se puede apreciar que en la parte alta de un río las concentraciones son mínimas, para luego aumentar o disminuir de acuerdo con las apreciaciones anteriores.

En la *tabla 4.7* se incluyen, para cada estación seleccionada, datos respecto al área de drenaje, caudal medio y periodo de registro, así como la cuantificación del transporte de sedimentos suspendidos en promedio mensual multianual y anual, expresado en toneladas.

Estación	Cuenca	Área km <sup>2</sup>	Período de registro	Transporte diario (kilotoneladas /día)
Calamar	Magdalena	257,438	1972-1994	386,0
Incora K-7	C. del Dique	28	1972-1994	26,7
Peñoncito	Magdalena	139,657	1972-1994	290,1
Arrancaplumas	Magdalena	54,359	1971-1994	144,0
Puente Balseadero	Magdalena	5,875	1973-1994	14,2
Julumito	Cauca	724	1985-1994	0,3
Puerto Valdivia	Cauca	37,966	1976-1994	121,0
Las Varas	Cauca	59,012	1973-1994	149,1
Cuestecita	Ranchería	2,240	1980-1994	0,3
Cotoca Abajo	Sinú	14,915	1970-1994	11,7
Puente Las Sánchez	Atrato	333	1982-1994	0,9
Puerto Barco	Catatumbo	5,179	1978-1994	6,3
Puente Lleras	Meta	8,358	1973-1994	45,6
Acetílico	Meta	100,250	1991-1994	111,7
Guayaré	Guaviare	139,520	1993-1994	85,2
Angosturas	Caquetá	5,676	1984-1994	20,8
Puente Texas	Putumayo	2,900	1984-1994	4,7
Tadó	San Juan	1,661	1986-1994	7,1
Puente Pusmeo	Patía	14,162	1972-1994	37,2

**Tabla 4.7.** Transporte de sedimentos en los principales ríos colombianos. (Fuente: IDEAM)

## Evaluación de eventos extremos en 1995-2000

Los eventos extremos a continuación sólo hacen alusión a los niveles y caudales altos, que pueden llegar a producir inundaciones y anegamientos.

En general los eventos hidrológicos extremos se refieren en el tiempo a procesos lentos (días) o rápidos (horas). Los rápidos, de régimen torrenciales, se presentan en ríos y quebradas de alta montaña; generalmente originan crecientes súbitas, con tiempos de ondas de viaje cortos, de horas, y pueden generar represamientos y avalanchas. Los de régimen aluvial, que se presentan en los grandes ríos de planicie –parte baja de la cuenca Magdalena-Cauca y la Orinoquia colombiana–, alcanzan los niveles extraordinarios después de algunos días.

A partir de los registros históricos, con información sobre niveles extremos en las diferentes estaciones hidrológicas, se evalúa la recurrencia con la cual estos eventos se presentan. La magnitud de cada evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia, la probabilidad de que determinado nivel sea alcanzado por

Estación	Niveles máximos (cm)					
	2	5	10	20	50	100
<b>Magdalena</b>						
Pte. Santander	514	586	626	662	703	731
Purificación	701	748	775	799	827	846
Nariño	670	745	793	837	894	936
Pto. Salgar	516	552	582	617	670	718
Pto. Berrío	541	569	585	599	615	626
El Banco	839	887	908	922	937	946
<b>Cauca</b>						
La Balsa	334	393	429	462	502	531
Juanchito	536	610	651	685	725	752
Mediacanoa	574	616	635	649	664	673
La Victoria	670	751	796	834	878	908
Bolombolo	514	589	631	667	708	736
Pto. Valdivia	481	561	616	670	744	802
La Coquera	380	442	481	516	560	592
Las Varas	542	577	596	611	629	640
<b>Sinú</b>						
La Despensa	481	516	537	554	575	590
Mocarí	1,460	1,530	1,590	1,660	1,760	1,840
Montería	541	582	606	627	652	670

**Tabla 4.8.** Niveles máximos para diferentes períodos de retorno.  
(Fuente: IDEAM)

las aguas en un lapso de tiempo que se define como periodo de retorno ( $T_r$ )<sup>8</sup>. Es decir, que aquellos niveles o crecientes extraordinarias se presentan con menor frecuencia que aquellos eventos más moderados.

Para el cálculo de los diferentes períodos de retorno ( $T_r$ ), se toman los valores máximos registrados anualmente por cada estación y se realiza el análisis estadístico de frecuencia para los niveles máximos. Con base en esto se presentan en la *tabla 4.8* los diferentes períodos de retorno para los niveles de 17 estaciones localizadas en la cuenca Magdalena-Cauca y el río Sinú.

Para las zonas de alta montaña, cuyas características topográficas determinan la presencia de estos eventos naturales en forma repentina y torrencial, la predicción se hace con base en los pronósticos de lluvia y otros elementos del clima, una vez establecida la probabilidad de ocurrencia. Colombia cuenta con una red de estaciones automáticas que transmite en tiempo real el estado de los niveles de los principales ríos del país, gracias a la cual se puede

8 Número de años en que los niveles alcanzaron al menos una vez determinado valor máximo. Es importante aclarar que este periodo no se refiere a un periodo cíclico de tiempo: por ejemplo, un nivel máximo con periodo de retorno de 10 años presentado en 1984, puede ser alcanzado dos años después.

dar los avisos necesarios a la población y detectar con antelación la formación de posibles eventos extremos.

Para efectos de alertas se recibe información de 56 estaciones hidrológicas de niveles y de 80 estaciones pluviométricas, que transmiten permanentemente información en tiempo real, con intervalos de una hora, sobre el nivel de los ríos y el volumen de precipitación; además, llega información de 36 estaciones adicionales por radio y teléfono. Espacialmente cerca del 75% de las estaciones automáticas de niveles están ubicadas a lo largo de toda la cuenca Magdalena-Cauca, desde la parte alta hasta la zona baja, con algunas estaciones ubicadas en afluentes importantes; el otro 25% está distribuido en las cuencas de los ríos Sinú y San Jorge, en los ríos del piedemonte Llanero y en los de la cuenca del Pacífico.

En los principales ríos, como el Magdalena y el Cauca, se evaluaron los tiempos de viaje de las ondas de crecientes, de tal manera que se puede conocer con antelación la hora de llegada de la creciente a un punto determinado y, con las cotas de inundación, se da aviso oportuno a las poblaciones afectadas. Por ejemplo, para las crecientes que se presentaron en enero de 1997 en el Valle del Cauca, concretamente en Juanchito, se hizo un seguimiento de la onda creciente a través del río Cauca y se logró prevenir a tiempo a las poblaciones ribereñas sobre daños mayores.

En la *tabla 4.9* se presenta la relación de eventos extraordinarios ocurridos durante el periodo 1995-2000, incluyendo el nivel máximo alcanzado en la estación hidrométrica, donde la hay, y el periodo de retorno correspondiente a este nivel.

## Calidad del agua

La calidad del agua está definida por su composición química y por sus características físicas y biológicas, adquiridas a través de los diferentes procesos naturales y antropogénicos. Éstos implican contacto y disolución de los componentes minerales de las rocas sobre las cuales el agua actúa como agente meteorizante, en sus diferentes estados de agregación –sólido, líquido y gaseoso–, además de intervenir como disolvente de los gases presentes en la atmósfera. La calidad del agua natural y su variación espaciotemporal se modifica por el influjo de las múltiples actividades socioeconómicas, de acuerdo con las características propias de estas dinámicas. Comúnmente la calidad del agua se expresa en términos de cantidades mensurables y relacionadas con su uso potencial. La composición general de los diversos tipos de agua en la hidrosfera puede estudiarse mejor dentro del marco de referencia del ciclo hidrológico.

Fecha	Cuenca	Tipo de evento	Estación	Nivel máximo	Tr (años)
1995					
Jun-04	Cuenca Baja río San Jorge	Anegamiento	Montelíbano	5,56	
Jun-16	Cuenca media y baja río Sinú	Niveles críticos	Mocarí	14,9	2
Jul-01	Cuenca alta río Sinú y San Jorge	Inundaciones	La Despensa	5,27	5
Ago-10	Río San Jorge	Anegamiento			
Oct-Nov	Parte baja cuenca Magdalena-Cauca	Inundaciones	El Banco	8,34	2
Oct-01	Parte media y baja río Sinú	Anegamiento	Libertador	5,0	
1996					
Marzo	Parte baja del río Cauca	Anegamiento			
Junio	Parte baja cuenca Magdalena-Cauca	Inundaciones			
Junio	Parte baja cuenca del Sinú y San Jorge	Desbordamientos	La Despensa	5,16	5
Junio	Río Casanare	Desbordamientos			
Julio	Ríos y quebradas de la Sierra Nevada de Santa Marta	Desbordamientos			
Agosto	Río Otún, Dos Quebradas	Inundaciones			
Agosto	Río Atrato	Inundaciones	Quibdó	6,22	
Septiembre	Parte alta río San Jorge	Crecientes súbitas	Libertador		
1997					
Enero	Parte alta río Cauca	Desbordamientos	Juanchito	7,00	25
Marzo	Parte alta río San Jorge	Incrementos extraordinarios de sedimentos			
1998					
Febrero	Río de Oro	Desbordamientos			
Junio	Río Arauca	Desbordamientos			
Junio	Río Putumayo	Desbordamientos			
Junio	Río Caquetá	Desbordamientos			
Julio	Río Hacha	Desbordamientos	Florencia		
Julio	Río Guaviare	Desbordamientos	San José del Guaviare		
Octubre	Bajo Baudó	Desbordamientos			
Noviembre	Bajo Magdalena	Desbordamientos	El Banco		
1999					
Febrero	Magdalena medio	Inundaciones	Barrancabermeja		
Febrero	Bajo Cauca	Inundaciones	Caucasia		
Abril	Parte media cuenca Magdalena	Desbordamientos	Puerto Salgar	5,65	50
Mayo	Ríos Putumayo y Caquetá	Inundaciones	Puerto Leguízamo		
Octubre	Río Atrato	Inundaciones	Quibdó		
Octubre	Bajo Magdalena Tamalameque	Inundaciones			
Noviembre	Parte media cuenca Magdalena	Desbordamientos	Puerto Salgar	5,55	40
2000					
Mayo	Parte media cuenca Magdalena	Desbordamientos	Puerto Salgar	5,2	10

Tabla 4.9. Eventos extraordinarios en 1995-1997. (Fuente: DNAP. Adaptado por IDEAM, 2000)

El océano es una solución aproximadamente 1,1 molar de aniones y cationes. Las aguas superficiales que se originan en cuencas donde las rocas principales son graníticas contienen muy pequeñas cantidades de materiales disueltos, no más de 30 mg/L. Otro tipo general

de aguas superficiales tiene su origen en cuencas distintas a las graníticas; esta agua tiene valores medios de calcio y magnesio, alcalinidad y contenido mineral total; en algunos casos se usa como suministro público para las ciudades.

Las aguas subterráneas en general tienen concentraciones de material disuelto superiores a las de las superficiales. Esto se debe al contacto estrecho entre el agua, cargada de dióxido de carbono, ( $\text{CO}_2$ ), las rocas y la tierra en el suelo, así como el tiempo de disolución. Además, puede agregarse  $\text{CO}_2$  al agua en el suelo por la actividad de microorganismos.

La calidad del agua se percibe de diferentes formas, según la mirada de los diversos sectores de la sociedad. Por ejemplo, los especialistas en salud pública enfatizan en lo que tiene que ver con la presencia de virus y bacterias en el agua, en relación con la seguridad de su uso como agua potable; para los pescadores, la calidad del agua está relacionada con la supervivencia de los peces.

La calidad del agua y su grado de alteración o contaminación, definido éste como la modificación fisicoquímica, biológica o radiológica del recurso natural agua, inducida por las actividades socioeconómicas que limitan o perjudican su uso, se fija por la comparación de los valores que asumen los parámetros fisicoquímicos, biológicos, microbiológicos y radiológicos con estándares y criterios pre establecidos.

Conviene tener presente que un agente contaminante no es necesariamente una sustancia siempre dañina y dispuesta a atacar la naturaleza. Lo que hace que una sustancia se convierta en contaminante es su ‘concentración en cantidad excesiva, en un lugar indebido o en un momento inopportuno’. Son los contaminantes, por ende, materia o energía que las actividades humanas introducen inevitablemente en el medio y que, debido a su incremento excesivo, ponen, o pueden poner, en peligro la salud del hombre, su bienestar o sus recursos naturales, de modo directo o indirecto.

Además de las condiciones naturales, tres factores determinan las características de una situación de contaminación: la magnitud y la densidad de la población, la tasa de producción y consumo y el nivel y uso de la tecnología. La amenaza de contaminación debe tener un indicador, y se evidencia cuando la capacidad del medio para absorberla o neutralizarla comienza a ceder.

La mayor parte de los problemas concernientes a la calidad del agua tienen que ver con su contaminación por materia orgánica, nutrientes y una amplia gama de sustancias químicas. Esta contaminación puede ser un obstáculo en el uso sostenible del recurso agua para el abastecimiento humano, agrícola, industrial, hidroenergético, recreacional y turístico.

## Caracterización de la calidad de los cuerpos de agua

La calidad de los cuerpos de agua puede ser evaluada por lo que se podría llamar tres campos de fuerza: hidrodinámica, fisicoquímica y biológica. Para una caracteriza-

ción completa de la calidad del agua es importante considerar el seguimiento de los campos mencionados.

Todos los cuerpos de agua están interconectados, desde la atmósfera hasta el mar, a través del ciclo hidrológico. El agua constituye un *continuum*, con diferentes estados y categorías, que van desde las aguas lluvias hasta las aguas marinas. Entre los componentes que hacen parte del ciclo hidrológico son de especial importancia la aplicación de modelos de calidad a las aguas continentales, particularmente, a los ríos, lagos y aguas subterráneas. Todas están estrechamente interconectadas y pueden influenciarse entre ellas en forma directa o a través de estados intermedios. Cada uno de los tres principales tipos de cuerpos de agua tiene diferentes propiedades.

### Propiedades fisicoquímicas

Cada cuerpo de agua tiene un patrón individual de carácter físico y químico característico, determinado por las condiciones climáticas, geomorfológicas y geoquímicas que prevalecen en los sistemas hídricos superficiales y subterráneos del área de drenaje. Las características resumidas, tales como los sólidos totales disueltos, la conductividad eléctrica y el potencial redox, ofrecen una clasificación general de cuerpos de agua similares, presentes en la naturaleza. El contenido de minerales, determinado por los sólidos totales disueltos, es un rasgo esencial en la calidad de cualquier cuerpo de agua y es consecuencia del balance entre disolución y precipitación. El contenido de oxígeno es un rasgo vital de cualquier cuerpo de agua, porque está fuertemente influenciado por la solubilidad de los metales, esencial para todas las formas de vida biológica.

La calidad química del ambiente acuático varía de acuerdo a la geología local, al clima, a la distancia, al océano y a la cantidad de suelo cubierto, entre otros factores. Si las aguas superficiales estuvieran totalmente inafectadas por la actividad humana, entre un 90% y un 99% de las aguas superficiales tendría las concentraciones naturales de las especies químicas necesarias para la vida acuática y para la mayor parte de los usos humanos.

En la calidad del agua, el material particulado es un factor clave, ya que regula los procesos de absorción y desorción de otras sustancias; estos procesos dependen de la cantidad, el tipo, el carácter y del tiempo de contacto entre el material particulado (orgánico e inorgánico) con un volumen unitario de agua. La variabilidad temporal de las partículas disueltas y el contenido de materia en los cuerpos de agua resulta principalmente de las interacciones entre la variabilidad hidrodinámica, la solubilidad mineral, las carac-

terísticas del material y la naturaleza e intensidad de la actividad biológica.

## Características biológicas

El desarrollo de la biota (flora y fauna) en las aguas superficiales está dictado por una variedad de condiciones ambientales, que determinan la selección de especies, así como también el comportamiento fisiológico de los organismos individuales. La productividad primaria de la materia orgánica, en la forma de fitoplancton y macrofitas, es intensiva en lagos y reservorios y muy limitada en los ríos. La degradación de las sustancias orgánicas y la producción bacterial asociada es un proceso que toma tiempo, lo cual es importante en las aguas subterráneas y en lagos de cierta profundidad, cuando no están expuestos directamente a la luz del sol.

En contraste con la calidad química de los cuerpos de agua, que puede ser medida con métodos analíticos adecuados, la descripción de la calidad biológica de un cuerpo de agua requiere una combinación de características cualitativas y cuantitativas. El monitoreo biológico puede hacerse a dos niveles diferentes: la respuesta de las especies individuales a los cambios en su ambiente o la respuesta de las comunidades biológicas a los cambios de su ambiente.

El sistema de clasificación de la calidad del agua, basado en características biológicas, ha sido desarrollado para una variedad de cuerpos de agua. El análisis químico de especies seleccionadas (ostras, por ejemplo) y otros tejidos seleccionados (músculo o hígado de peces) para evaluar contaminantes, puede ser considerado como una combinación de un monitoreo químico y biológico. La calidad biológica, incluyendo los análisis químicos de la biota, tiene una dimensión temporal mayor que la calidad química del agua, puesto que la biota puede ser afectada por especies químicas, por factores hidrológicos, por eventos ocurridos pocos días, algunos meses o años antes de que el monitoreo fuera efectuado.

## Definiciones relacionadas con la calidad del agua

Ante la complejidad de factores que determinan la calidad del agua y la extensa selección de variables cruzadas para describir el *estatus* de los cuerpos hídricos en términos cuantitativos, es difícil llegar a una definición simple de calidad de agua; desde hace algún tiempo se ha entendido y relacionado con los requerimientos de uso del agua y la habilidad para medir e interpretar sus características.

En adelante el término 'calidad de agua' se usará referido a la calidad del ambiente acuático; entendida ésta como una serie de concentraciones, especiaciones y partición física de sustancias inorgánicas u orgánicas, las cuales describen las variaciones espaciotemporales debidas a factores internos y externos al cuerpo de agua, que reflejan la composición y estado de su biota.

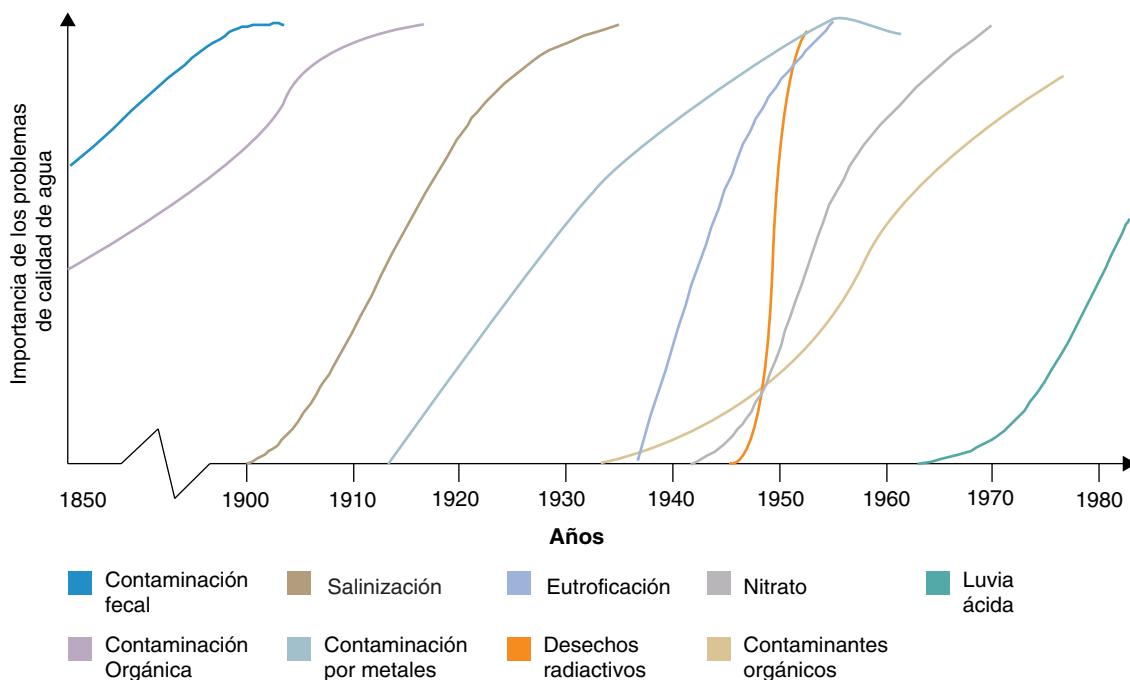
En el mismo sentido se entiende por contaminación del ambiente acuático a la introducción por el hombre, directa e indirecta, de sustancias o energía con resultados negativos o deletéreos que generan riesgos para los recursos vivos, amenazas para la salud pública, perturbación de las actividades acuáticas, incluyendo la pesca, disminución o impacto de la calidad de agua con respecto a su uso en actividades industriales, agrícolas y actividades económicas, así como reducción de las amenidades, es decir, limitaciones en las actividades recreacionales y de estética del paisaje.

La figura 4.3 muestra la evolución del concepto de calidad del agua en países industrializados. Esta comprensión de la calidad del agua en diferentes períodos está condicionada por el conocimiento científico de la época, la presión sobre el recurso hídrico y los efectos de la calidad sobre el medio ambiente, la salud humana y las actividades de mayor demanda del recurso.

La evaluación de la calidad del agua es el proceso total de la naturaleza física, química y biológica del agua en relación con su estado natural, los efectos humanos, los usos intencionales y los usos particulares, que pueden afectar la salud humana y la salud del sistema acuático en sí mismo. El monitoreo de la calidad del agua es el compendio actual de información de una serie de localidades a intervalos regulares, destinado a suministrar los datos con los cuales definir las condiciones corrientes, las tendencias establecidas, etc.

La descripción de la calidad del ambiente acuático se puede hacer a través de medidas cuantitativas, tales como determinaciones fisicoquímicas (en agua, en material particulado o en tejidos biológicos) y pruebas bioquímicas-biológicas (demanda bioquímica de oxígeno, pruebas de toxicidad, etc.), o mediante descripciones semicuantitativas y cualitativas, como índices bióticos, aspectos visuales, inventarios de especies, olores, etc. Estas determinaciones se hacen en el campo y en el laboratorio, y arrojan varios tipos de datos con diferentes tipos de técnicas interpretativas.

La evaluación de la calidad del agua incluye el uso del monitoreo para definir la condición del agua, brindar las bases para detectar las tendencias y proveer la información con la cual se puedan establecer las relaciones de causa-efecto. Existe una secuencia lógica de tres componentes: monitoreo, evaluación y gestión y manejo.



**Figura 4.3** Secuencia de los problemas de la calidad del agua en países industrializados.  
(Fuente: Horne; adaptado por L. Panizzo)

Además hay una retroalimentación, debida a que el manejo del recurso hídrico requiere inevitablemente una articulación con el monitoreo para reforzar las regulaciones o normas, así como también evaluaciones a intervalos periódicos para verificar la efectividad de las decisiones tomadas.

El principal objetivo de un proyecto de seguimiento global de las aguas superficiales es, según Gems/Water – que da un ejemplo ilustrativo de la complejidad de la tarea de evaluación y su relación con la gestión (WHO, 1991)–, suministrar a los gobiernos, así como a la comunidad científica y pública, una evaluación sobre la calidad en el nivel mundial de las corrientes superficiales relacionadas con la salud humana, de los ecosistemas acuáticos y el ambiente global. Además un proyecto de estas características define el *estatus* de la calidad del agua, identifica y cuantifica las tendencias de su calidad, define la causa de las condiciones observadas y sus tendencias, identifica los tipos de calidad de agua y los problemas que ocurren en áreas geográficas específicas, y finalmente suministra la información acumulada y las evaluaciones que pueden servir como recurso de gestión y manejo para ser utilizadas en evaluación de alternativas y tomar las decisiones necesarias.

La calidad fisicoquímica de las aguas prístinas (agua en su máximo estado de pureza en el medio ambiente, prácticamente libre de la presencia de otras sustancias) podría encontrarse normalmente en localidades con inexistencia de impactos antropogénicos. En la práctica,

las aguas prístinas son muy difíciles de encontrar como resultado del transporte de sustancias por vía atmosférica y su subseciente deposición en localizaciones distantes de su origen. Las concentraciones naturales –gobernadas por los factores descritos anteriormente– podrían variar en uno o más órdenes de magnitud entre diferentes cuencas de drenaje.

Después de que las aguas prístinas alcanzan su condición de contaminadas se puede presentar estados subsecuentes de degradación de su calidad: alteración con evidencia del impacto humano, pero sin peligro para la biota; restricciones en el uso del agua (cambios que pueden ser sólo detectados por medidas químicas repetidas sobre tiempos suficientemente espaciados), y degradación de la calidad del agua, que implique una posible restricción para usos específicos debido a las normas de calidad recomendadas por las autoridades (locales, regionales o globales). Cuando una concentración máxima aceptable para variables seleccionadas, en relación con el uso, ha sido excedida o el hábitat y la biota han sido fuertemente modificados, entonces la calidad del agua se define como contaminada.

## Impactos antropogénicos sobre la calidad del agua

Con el advenimiento de la industrialización y el aumento de la población, se ha incrementado las necesidades de agua, cada vez con mejor y mayor calidad. A su vez,

los requerimientos han emergido principalmente para: agua potable e higiene personal; pesquerías; agricultura (irrigación); navegación para transporte de bienes y suministros; producción industrial; enfriamiento en plantas de abastecimiento de energía eléctrica y actividades de recreación, tales como pesca y natación. Afortunadamente, la mayor parte de la demanda se da más en términos de cantidad que de calidad para irrigación en agricultura y enfriamiento industrial; actividades en las cuales la concentración crítica puede ser sólo de una o dos variables. Los suministros de agua potable y las manufacturas industriales especializadas ejercen la más sofisticada demanda sobre la calidad del agua, pero sus necesidades cuantitativas son relativamente moderadas. Paralelamente a estos usos, las aguas han sido consideradas como el mejor medio para limpiar, dispersar, transportar y disponer los residuos de las actividades humanas.

Cada uso del agua, incluyendo la descarga de residuos, posee una carga específica que es aproximadamente predecible en lo que tiene que ver con los impactos sobre la calidad del ambiente acuático. La intervención con estructuras y obras civiles en el ciclo hidrológico, a través de canalizaciones o represas de ríos, así como la extracción de agua de los acuíferos, es entendida en general como un objetivo benéfico. La experiencia ha mostrado, sin embargo, que los resultados a largo plazo degradan frecuentemente el ambiente y, como resultado, se deprimen los beneficios deseados. Los más importantes impactos antropogénicos sobre la calidad del agua en la escala global se resumen en la *tabla 4.10*, distinguiendo la gravedad del impacto del uso en diferentes tipos de cuerpos de agua.

Constituyentes	Cuerpos de agua <sup>1</sup>			
	Ríos	Lagos	Reservorios	Aguas subterráneas
Patógenos	XXX	X <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	X
Sólidos suspendidos	XX	na	X	na
Materia orgánica biodegradable <sup>3</sup>	XXX	X	XX	X
Eutrofificación <sup>4</sup>	X	XX	XXX	na
Nitrato como contaminante	X	0	0	XXX
Salinización	X	0	X	XXX
Elementos traza	XX	XX	XX	XX <sup>5</sup>
Microcontaminantes orgánicos	XXX	XX	XX	XXX <sup>5</sup>
Acidificación	X	XX	XX	0
Modificación del régimen hidrológico <sup>6</sup>	XX	X		X

**Tabla 4.10.** Principales factores de calidad de las aguas superficiales en la escala global. (Fuente: Organización Mundial de la Salud)

XXX= Deterioro grave o global. XX= Deterioro importante. X= Deterioro ocasional o regional. 0= Deterioro bajo o deterioro escaso. na= No aplicable

<sup>1</sup> Esta es una estimación en la escala global; en la escala regional estos intervalos pueden variar de acuerdo con el desarrollo económico y uso de la tierra. <sup>2</sup> Principalmente, pequeños cuerpos de agua poco profundos. <sup>3</sup> Otros que resultan de la producción primaria. <sup>4</sup> Algas y macrofitas. <sup>5</sup> Rellenos sanitarios, minería. <sup>6</sup> División, construcción de diques.

Los criterios de calidad de agua, los estándares y la legislación se usan como los principales medios administrativos para la gestión de la calidad del agua para cumplir con los requisitos del usuario. Los requerimientos más comunes se desarrollan sobre las aguas potables, que en muchos países tienen sus propios estándares, basados en las directrices de la Organización Mundial de la Salud (WHO, en inglés). En algunos casos, la calidad de las aguas naturales es inadecuada para ciertos propósitos

Contaminación por	Uso del agua						
	Agua potable	Vida acuática Pesquerías	Recreación	Irrigación	Usos industriales	Generación de potencia y enfriamiento	Transporte
Patógenos	XX	0	XX	X	XX <sup>1</sup>	na	na
Sólidos suspendidos	XX	XX	XX	X	X	X <sup>2</sup>	XX <sup>3</sup>
Materia orgánica	XX	X	XX	+	XX <sup>4</sup>	X <sup>5</sup>	na
Algas	X <sup>5,6</sup>	X <sup>7</sup>	XX	+	XX <sup>4</sup>	X <sup>5</sup>	X <sup>8</sup>
Nitratos	XX	X	Na	+	XX <sup>1</sup>	na	na
Sales	XX	XX	Na	XX	XX <sup>9,10</sup>	na	na
Elementos traza	XX	XX	Na	XX	XX	na	na
Microcontaminantes orgánicos	XX	XX	X	X	?	na	na
Acidificación	X	XX	X	?	X	X	na

**Tabla 4.11.** Límites del uso del agua por la degradación de su calidad. (Fuente: Organización Mundial de la Salud)

XX= Requiere tratamiento para obtener el uso descrito. X= Menor. 0= Ninguno. na= No aplicable. += La calidad del agua degradada puede ser beneficiosa para este uso específico. ?: Los efectos no se conocen.

<sup>1</sup> Industrias alimenticias. <sup>2</sup> Industrias de abrasivos. <sup>3</sup> Deposición de sedimentos en canales. <sup>4</sup> Industrias electroquímicas. <sup>5</sup> Taponamientos de filtros. <sup>6</sup> Olores y gusto. <sup>7</sup> En cultivo de peces, los altos contenidos de biomasa algal pueden ser aceptados. <sup>8</sup> Desarrollo del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). <sup>9</sup> Incluye la industria del boro, fluoruros, etc. <sup>10</sup> Ca, Fe, Mn, en industrias textiles, etc.

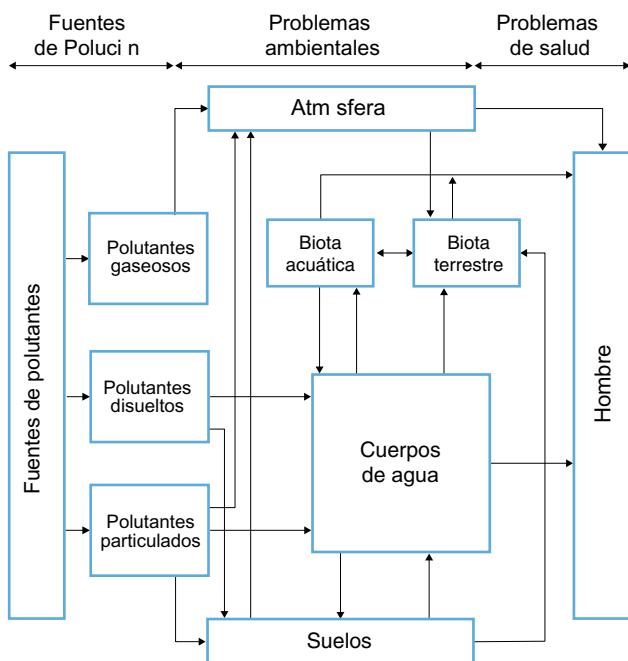
(tabla 4.11), como se define en las directrices, especialmente en lo relacionado con las concentraciones. Sin embargo, otros cuerpos de agua pueden ser útiles para algunas actividades después de que sus condiciones naturales han sido alteradas por la contaminación.

Debido a los factores de complejidad que determinan la calidad del agua, se encuentran variaciones entre ríos o lagos en diferentes continentes o zonas hidroclimáticas. Igualmente, la respuesta a los impactos antropogénicos es muy variable. Como consecuencia, no existen estándares universales aplicables que puedan definir la línea base de la calidad química o biológica de las aguas; pero al menos se puede dar una descripción general de algunos tipos de ríos, lagos o acuíferos.

Aunque el mayor porcentaje de la degradación de la calidad del agua, a nivel mundial, es debida a las influencias antropogénicas, hay eventos naturales y catástrofes ambientales que pueden producir localmente graves deterioros del ambiente acuático. Los huracanes, deslizamientos e inundaciones, pueden ser algunos ejemplos. Algunos eventos naturales pueden agravarse por las actividades humanas; por ejemplo la erosión del suelo está asociada con los problemas de deforestación. La recuperación de la calidad de las aguas naturales toma con frecuencia muchos años, dependiendo de la escala geográfica y la intensidad del elemento.

## Fuentes de contaminantes y trayectorias

En general, los contaminantes pueden ser liberados al ambiente como gases, sustancias disueltas o en forma



**Figura 4.4** Ruta de los contaminantes potenciales relacionada con el ambiente acuático.

(Fuente: Horne; adaptado por L. Panizzo)

particulada. Los contaminantes llegan al ambiente acuático a través de una variedad de trayectorias, incluyendo la atmósfera y el suelo. La figura 4.4 ilustra en forma esquemática las principales trayectorias de los contaminantes que afectan la calidad del agua.

La mayor fuente de contaminación de las aguas superficiales es la acumulación y descarga de las aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas, ganaderas, mineras, etc. En las aguas agrícolas la aplicación de plaguicidas o fertilizantes es considerada como fuente difusa de contaminación. Varias fuentes de los principa-

Fuente	Bacterias	Nutrientes	Elementos traza	Plaguicidas, herbicidas	Microcontaminante orgánico	Aceites y grasas
Atmósfera		X	XXX, G	XXX, G	XXX, G	
Fuentes puntuales						
De residuos	XXX	XXX	XXX	X	XXX	
Efluentes industriales		X	XXX, G		XXX, G	XX
Fuentes difusas						
Agrícola	XX	XXX	X	XXX, G		
Dragado		X	XXX	XX	XXX	X
Navegación-Puertos	X	X	XX		X	XXX
Fuentes mixtas						
Residuos urbanos	XX	XX	XXX	XX	XX	XX
Residuos industriales		X	XXX	X	XXX	X

**Tabla 4.12.** Fuentes antropogénicas de contaminantes en el ambiente acuático.

X=Baja significación local XX=Significación moderada local/regional XXX=Significación alta local/regional G=Significado global  
Fuente: Organización Mundial de la Salud

les contaminantes se resumen en la *tabla 4.12*, con ejemplos de fuentes de contaminación.

La contaminación proviene de fuentes puntuales y/o difusas. Una fuente puntual es una entrada de contaminantes que puede estar relacionada con una salida simple; los vertimientos no tratados, o tratados inadecuadamente, son tal vez una fuente de este tipo; otras fuentes puntuales incluyen minerías o efluentes industriales. Las fuentes puntuales pueden estar localizadas espacialmente en los ambientes acuáticos y algunas se caracterizan por una descarga relativamente constante de sustancias contaminantes en períodos de tiempo específico; aunque pueden presentarse fluctuaciones debido a descargas accidentales. Ejemplos de este tipo son las aguas residuales domésticas.

Las fuentes difusas no pueden adscribirse a un punto o a una actividad humana simple, aunque puede tratarse de fuentes individuales simples dirigidas a un cuerpo de agua sobre un área extensa, como la escorrentía en áreas de actividades agrícolas, cuyo drenaje transfiere partículas orgánicas e inorgánicas de suelo, nutrientes, plaguicidas y herbicidas a los cuerpos de agua adyacentes; la escorrentía urbana proveniente de los viaductos de la ciudad y áreas adyacentes no canalizadas al sistema de alcantarillado; los lugares de disposición de residuos sólidos y/o líquidos que impactan principalmente las aguas subterráneas, etc.

La atmósfera es una de las guías y fuentes de contaminantes en el ambiente global. Las fuentes antropogénicas de materiales emitidos a la atmósfera incluyen: la combustión de hidrocarburos fósiles para generación de energía; la combustión de hidrocarburos fósiles en automóviles y otras formas de transporte; el aire acondicionado en climas cálidos y por necesidades industriales; la minería, principalmente de sulfuros metálicos; el transporte de suelos de regiones áridas y regiones agrícolas, y la volatilización de los productos agrícolas a partir de las regiones de aplicación y disposición. Estas fuentes generan un espectro de contaminantes orgánicos e inorgánicos que, transferidos a la atmósfera, se dispersan ampliamente por el sistema climático y se depositan a escala global.

La variabilidad temporal de la liberación de los contaminantes en el ambiente se puede diferenciar en cuatro categorías principales. Las fuentes pueden ser consideradas como permanentes o continuas (por ejemplo, residuos domésticos de la ciudad y residuos industriales), periódicas (las variaciones climáticas asociadas con el flujo de poblaciones turísticas o el procesamiento de alimentos), ocasional (la liberación de ciertos residuos industriales) y accidental (falla de tanques, accidentes de trenes o tractomulas, incendios, etc.).

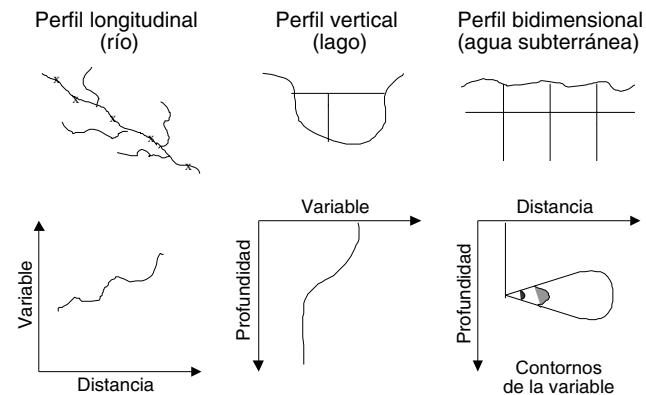
## Variaciones espaciales y temporales

Las variaciones en la calidad del agua son uno de los principales rasgos de los diferentes tipos de cuerpos de agua, ampliamente determinadas por las características hidrodinámicas del cuerpo de agua receptor. La calidad del agua varía en las tres dimensiones y posteriormente es modificada por la dirección del flujo y el tiempo de descarga. Por consiguiente, la calidad del agua no puede ser medida en un solo punto dentro del cuerpo del agua y, en ocasiones, puede requerir una grilla para los sitios de muestreo.

Para propósitos prácticos, y con el objeto de limitar el número de lugares de muestreo y de facilitar la presentación de los datos, se usan algunas simplificaciones para una grilla ideal de muestreo. Los ejemplos incluyen perfiles longitudinales y verticales, tales como se muestran en la *figura 4.5*. Dos perfiles dimensionales son adecuados para observar las plumas de contaminación desde la fuente, presentando la información a diferentes profundidades u horizontalmente en los mapas. Esto es aplicable en particular a los lagos, reservorios y aguas subterráneas.

Las variaciones temporales de la calidad de los cuerpos de agua pueden ser descritas a través del estudio de las concentraciones (también de las cargas, en el caso de ríos) o por la determinación de las tasas de sedimentación, biodegradación o transporte. Es importante definir la variabilidad temporal, para la cual se pueden considerar cinco tipos:

- Variabilidad minuto a minuto, día a día, como resultado de la mezcla de aguas, de las fluctuaciones de entradas, etc. Estas variaciones están vinculadas a las condiciones meteorológicas y a la medida de los cuer-



**Figura 4.5** Ejemplos de la descripción de las variaciones espaciales en la calidad del agua.  
(Fuente: IDEAM)

- pos de agua, como por ejemplo, las variaciones de flujo del río.
- Variabilidad diaria (24 horas de variación) limitada a los ciclos biológicos, a los ciclos día/noche, luz/oscuridad (por ejemplo oxígeno, nutrientes, pH, etc.) y a los ciclos de entrada del contaminante (residuos domésticos).
  - Variabilidad día a mes, vinculada con los factores climáticos (régimen del río, tonos del lago, etc.) y las fuentes de contaminación (aguas residuales industriales, escorrentías procedentes de procesos agrícolas).
  - Ciclos estacionales hidrológicos y biológicos (dependientes, en especial, de los factores climáticos).
  - Tendencias año-año, debidas principalmente a influencia humana.

Una vez que las causas de la degradación de la calidad del agua han sido eliminadas o reducidas (tales como el tratamiento de las fuentes puntuales o la regulación de las fuentes difusas), el periodo de recuperación del ambiente acuático puede tomar desde semanas hasta milenios (ríos afectados por las aguas de relave de minas, como fue el caso de la contaminación de algunos ríos de Gales en el periodo romano).

Las escalas temporales y espaciales de la calidad de las aguas están asociadas con los tiempos de residencia del agua en cada componente del ciclo hidrológico; sin embargo, otros hechos están fuertemente vinculados con estos tiempos o con el tamaño del cuerpo de agua; por ejemplo, los cambios en el hábitat acuático corriente debajo de un río con represas pueden tener lugar en un lapso de más de 100 años. Desde la perspectiva humana, el periodo de recuperación entre 10 y 100 años puede ser considerado como una forma limitada de reversibilidad, mientras que una recuperación que toma más de 100 años puede ser considerada como una degradación irreversible del ambiente acuático.

## Parámetros de la calidad del agua

La selección de parámetros o variables para evaluar la calidad de agua depende básicamente de los objetivos relacionados con su uso. La selección apropiada de los parámetros permite alcanzar las metas de eficiencia en los procesos de mejoramiento de la calidad del agua. Cada parámetro debe ser discutido con respecto a sus orígenes, fuentes, comportamiento, transporte y transformación en el sistema acuático.

Los criterios de calidad del agua se establecen científicamente de acuerdo con los factores de intensidad; estos criterios forman la base para juzgar, con respecto a la

compatibilidad de la composición del agua, los objetivos ecológicos o los requeridos para un determinado uso. Los estándares son reglas, principios o niveles de tolerancia establecidos por las autoridades ambientales, como parte de los programas de conservación de la calidad del recurso hídrico para propósitos específicos.

El proceso de fijar estos criterios se desarrolla a través de experimentos científicos. Un criterio de calidad del agua puede estar basado en la morbilidad o toxicidad crónica de varias sustancias para el hombre o la vida acuática, o también puede estar relacionado con los métodos técnicos para remover sustancias específicas del agua.

Existe un buen número de parámetros ambientales que se usan como indicadores de calidad de agua, entre otros: temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, turbidez, sulfatos, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y metales pesados. A continuación se da una breve descripción del significado ambiental de cada parámetro.

### Temperatura

Las corrientes de agua están sometidas a variaciones de temperatura a lo largo de su recorrido como una situación normal debida, entre otras razones, a las fluctuaciones del clima, a las variaciones altitudinales y a las que ocurren en periodos de 24 horas en un mismo sitio. Las lagunas, humedales y ciénagas pueden exhibir estratificación vertical de la temperatura de acuerdo con su profundidad, pero también debida a la circulación del aire, la nubosidad, la profundidad del cuerpo de agua y la acción de otras variables. Cuando la temperatura del agua se incrementa, la velocidad de las reacciones químicas aumenta conjuntamente con la evaporación y volatilización de sustancias químicas, en especial, de las orgánicas. Por otra parte, el incremento de la temperatura disminuye la solubilidad de los gases en el agua, como es el caso del oxígeno, lo cual determina cambios en su déficit.

La temperatura tiene una gran influencia sobre otras variables de calidad acuática. La tasa metabólica de los organismos está relacionada con la temperatura, y en las aguas cálidas la respiración incrementa el consumo de oxígeno y la descomposición de la materia orgánica; como consecuencia de este efecto, se pueden presentar eventos de mortandad masiva de peces en tramos específicos de las corrientes, a la vez que se hace mayor el crecimiento de bacterias y fitoplancton, lo cual produce en algunos tramos el incremento de la turbidez del agua y el aumento masivo de algas, debido a las condiciones de suministro de nutrientes.

La temperatura de las aguas superficiales generalmente se encuentra en el intervalo comprendido entre 0 y 30°C, aunque en algunos sitios es normal encontrar temperaturas mayores de 30°C. Las fluctuaciones de temperatura en las diferentes épocas del año suelen relacionarse con las condiciones climáticas. Además, pueden encontrarse temperaturas anormalmente altas debido a descargas térmicas procedentes principalmente de termoeléctricas, siderúrgicas, fundiciones y de plantas de tratamiento de aguas residuales.

## pH

El pH (potencial de hidrógeno), definido como un valor numérico u operador adimensional que se relaciona con el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno a una temperatura dada, indica la intensidad del carácter ácido (acidez) o básico (alcalinidad) del agua y puede variar entre 0 y 14, donde 0 es el valor más ácido, 7 es neutro y 14 el más básico, controlado por los compuestos químicos disueltos.

Las aguas naturales usualmente tienen un pH entre 6,5 y 8,5, y depende de la geoquímica de los suelos, de las aguas de lavado y de la dinámica física y química del dióxido de carbono, el ácido carbónico, carbonatos y bicarbonatos, iones que siempre están presentes en las aguas naturales, así como también los ácidos húmicos y fúlvicos. Salvo en el caso de vertimientos industriales particulares o de condiciones geológicas particulares (presencia de suelos y rocas de carácter ácido), es poco usual que el agua superficial presente un pH lejano a este intervalo, gracias a su capacidad tampón (de amortiguación o regulación del pH por la interacción de sustancias ácidas y básicas) junto con las sustancias enumeradas.

## Acidez y alcalinidad

La acidez y alcalinidad están basadas en la capacidad de neutralización de ácidos, y se expresan generalmente como milímoles por litro (mmol/L). Cuando el agua no tiene capacidad de regulación, existe una interacción marcada con el pH. Sin embargo, como la mayoría de las aguas naturales contienen ácidos y bases débiles, la acidez y la alcalinidad están determinadas a través del pH. La acidez del agua está controlada por los ácidos minerales fuertes, los ácidos débiles, tales como el carbónico, húmico y fúlvico, y los productos de hidrólisis de las sales de metales (como hierro y aluminio) y también por los ácidos fuertes. La acidez se determina por titulación con una base fuerte por encima de pH 4 (acidez libre) o pH 8,3 (acidez total).

La alcalinidad del agua está controlada por la suma de bases titulables. Esta se toma como un indicador de la

concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, pero también incluye contribuciones de los boratos, fosfatos, silicatos y otros compuestos básicos. Las aguas de baja alcalinidad (menores de 24 mg CaCO<sub>3</sub>/L) tienen poca capacidad reguladora y, por consiguiente, son susceptibles de alterar su pH por la deposición ácida de la atmósfera. La alcalinidad se determina por titulación como la cantidad de un ácido fuerte necesaria para disminuir el pH de una muestra a 8,3 (alcalinidad libre) o a pH 4 (alcalinidad total).

## Potencial redox

El potencial redox (Eh) se caracteriza por informar el estado de oxidación-reducción (redox) de las aguas naturales. Iones del mismo elemento, pero en diferentes estados de oxidación, constituyen un sistema redox, el cual se caracteriza por tener un cierto valor. Los compuestos orgánicos también forman sistemas redox. La coexistencia de un número dado de estos sistemas sostiene un equilibrio que determina el estado redox de las aguas y a su vez lo caracteriza por el valor Eh. El oxígeno, el hierro y el azufre y algunos sistemas orgánicos tienen una influencia en la determinación del Eh: por ejemplo, los valores de Eh se incrementan y pueden alcanzar +700 milivoltios (mV), cuando las concentraciones de oxígeno se incrementan. La presencia de sulfuro de hidrógeno está asociada con una disminución del Eh por debajo de -100 mV o menos, por lo cual es evidente que existen unas condiciones reductoras.

El Eh puede variar en las aguas naturales desde -500 mV a +700 mV. Las aguas superficiales y las aguas subterráneas que contienen oxígeno disuelto generalmente están caracterizados por un Eh que fluctúa entre +100 mV y +500 mV. El Eh de las aguas minerales conectadas a depósitos de aceite (petróleo) suele presentar valores cuyo límite puede ser de -500 mV.

El potencial redox se determina potenciométricamente y debe ser medido *in situ*, aunque sea difícil de hacerlo; por esto los resultados y la interpretación de las medidas de Eh deben ser tratados con cautela. Como el Eh depende del contenido de gas en el agua, éste puede ser muy variable cuando el agua está en contacto con el aire. Por consiguiente la determinación del Eh debe hacerse inmediatamente después del muestreo o tan pronto como sea posible; en el caso de aguas subterráneas, la medida se hace en el momento en que se obtiene la descarga de la bomba.

## Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, que es una medida de la capacidad de una solución acuosa para conducir una co-

riente eléctrica, depende de la presencia de iones, su concentración total, movilidad, valencia, concentración relativa y temperatura de medición. La conductividad eléctrica se expresa en microsiemens por centímetro ( $\text{mS}/\text{cm}$ ) e indica el contenido de sales disueltas o de minerales en el agua (mineralización). Los sólidos disueltos totales, expresados en  $\text{mg}/\text{L}$ , pueden ser obtenidos por multiplicación de la conductividad por un factor comprendido entre 0,55 y 0,75. Este factor puede ser determinado para cada cuerpo de agua, pero permanece relativamente constante de acuerdo con las proporciones iónicas en el cuerpo de agua y si estas permanecen estables.

Los intervalos de conductividad eléctrica de las aguas superficiales varían de 10 a 1000  $\text{mS}/\text{cm}$ , pero pueden exceder los 1000  $\text{mS}/\text{cm}$ , especialmente en aguas superficiales que reciben una gran cantidad de aguas residuales contaminadas. La conductividad está relacionada con las zonas de contaminación alrededor de la descarga de un afluente y su seguimiento puede ser utilizado para estimar la extensión de la influencia del mismo; los valores asumidos por esta variable determinan el uso potencial del agua, debido a que el efecto de las actividades domésticas e industriales modifican los valores naturales de la conductividad.

## Oxígeno disuelto y déficit de oxígeno

Se entiende por oxígeno disuelto (OD) el oxígeno libremente disponible en el agua. La solubilidad del oxígeno en el agua se debe a varios factores, en particular, a la temperatura, presión atmosférica y salinidad, que para la mayoría de aguas superficiales se puede considerar cercana a cero. El contenido de oxígeno de las aguas naturales varía con la temperatura, la salinidad, la turbulencia, la actividad fotosintética y la presión atmosférica; la solubilidad del oxígeno disminuye a medida que la temperatura y la salinidad se incrementan. En aguas superficiales al nivel del mar, el OD varía de 15 hasta 8  $\text{mg O}_2/\text{L}$ , a temperaturas entre 0°C y 25°C.

El déficit de oxígeno indica la diferencia del oxígeno disuelto en el agua, en relación con el máximo teórico que puede estar presente, el cual se calcula a partir de los valores de altitud, temperatura y oxígeno disuelto, medidos en cada punto de monitoreo. La variación del contenido de oxígeno disuelto y, por ende, del déficit de oxígeno, puede ser función de la presencia de vegetales, materia orgánica oxidable, organismos y gérmenes aerobios, así como de la perturbación de los cambios atmosféricos y la presencia en la superficie de grasas, hidrocarburos o detergentes, entre otros. Mientras mayor

sea el déficit, más críticas son las condiciones de oxigenación en el agua.

Cada especie de peces tiene cierta tolerancia a los valores de déficit de oxígeno, pero en términos generales el valor mínimo de oxígeno disuelto que garantiza la supervivencia y viabilidad de la mayoría de especies de peces y comunidades acuáticas es aproximadamente de 4 a 5  $\text{mg}/\text{L}$  que, para las condiciones naturales, equivale a un déficit de oxígeno entre 30 y 60%, dependiendo de la temperatura del agua y de la altitud de cada sitio de monitoreo en particular; valores de OD por debajo de 2  $\text{mg O}_2/\text{L}$  causan la muerte a la mayoría de los peces.

Las variaciones del déficit de oxígeno y, por consiguiente, del oxígeno disuelto en un cuerpo de agua suceden de acuerdo con la época del año y también en un periodo de 24 horas, dependiendo de la temperatura y la actividad biológica; la respiración está relacionada con los procesos de descomposición de la materia orgánica y aumenta el déficit de oxígeno en aguas estancadas. En cuanto a las descargas de aguas domésticas con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, aumentan el déficit de oxígeno como resultado de la actividad microbiológica. En muchos casos el aumento del déficit de oxígeno determina condiciones anaeróbicas, especialmente en la proximidad de los sedimentos.

El oxígeno disuelto es mucho más limitado como indicador de la contaminación de las aguas subterráneas y no es útil para evaluar el uso de este tipo de agua para propósitos normales; además, la determinación de OD en aguas subterráneas requiere equipos de medición especiales. La medida de OD es crítica para el entendimiento científico de los procesos químicos y bioquímicos en aguas subterráneas. Puede esperarse que el agua al entrar al sistema subterráneo como recarga contenga concentraciones de oxígeno similares a aquellas de las aguas superficiales en contacto con la atmósfera. La materia orgánica o los minerales oxidables presentes en algunos acuíferos agotan rápidamente el oxígeno disuelto; por consiguiente, en acuíferos en donde existe material orgánico, la concentración de OD puede ser de 2 a 5  $\text{mg O}_2/\text{L}$ .

Hay dos métodos principales para determinar el oxígeno disuelto. El más antiguo es el método de titulación denominado *Winkler*, que involucra la fijación química del oxígeno en una muestra de agua colectada en una botella apropiada. La fijación se realiza en el sitio de muestreo y el análisis por titulación se hace en el laboratorio. El método es oneroso en tiempo, pero da buena precisión y exactitud. Es adecuado para la mayor parte de aguas y las muestras pueden ser almacenadas. En otro método se utiliza un electrodo de membrana, que tiene la ventaja de ser rápido y aplicable *in situ* para un

monitoreo continuo, pero su grado de precisión es difícil de mantener.

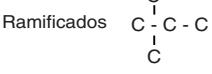
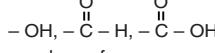
## Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en el proceso biológico de degradación de la materia orgánica en el agua; la DBO<sub>5</sub> representa la cantidad de oxígeno consumido por dicho proceso en cinco días. El término degradable puede interpretarse como expresión de la materia orgánica que eventualmente sirve de alimento a las bacterias presentes en las aguas naturales, en las aguas residuales domésticas y en las aguas residuales industriales. La DBO permite obtener información sobre la capacidad de amortiguación de los efectos relacionados con la disminución de oxígeno, en términos de la autodepuración de una corriente de agua y es la base de cálculo para el diseño de las plantas de tratamiento.

## Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida del oxígeno requerido para oxidar todos los compuestos químicos, tanto orgánicos como inorgánicos, presentes en el agua, por la acción de agentes fuertemente oxidantes en un medio ácido. Esta demanda se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg O<sub>2</sub>/L). La materia orgánica se oxida hasta convertirse en dióxido de carbono y agua, mientras que el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. Su significado ambiental tiene que ver con la presencia de especies químicas susceptibles de ser oxidadas: por ejemplo, la materia orgánica, ya sea biodegradable o no, además del hierro ferroso y otras especies químicas oxidables. En la *tabla 4.13* se muestran los factores determinantes de la persistencia de las especies químicas en el ambiente. Niveles altos de DQO en las aguas indican la presencia de vertimientos, que pueden ser de tipo industrial o doméstico, en aguas con poca capacidad de autodepuración.

La DQO se ha usado históricamente como una medida de la susceptibilidad a la oxidación de los materiales orgánicos e inorgánicos presentes en los cuerpos de agua y en los efluentes de aguas domésticas y plantas industriales; desafortunadamente la prueba de la DQO no es específica, ya que no diferencia el material orgánico del inorgánico. Tampoco es un indicador del carbono orgánico total presente en el cuerpo de agua, puesto que algunos compuestos orgánicos no son oxidados en las condiciones del análisis, mientras que algunos compuestos inorgánicos sí lo son. Sin embargo, la DQO es un

Resistente al ataque oxidativo y biológico	Susceptible al ataque oxidativo y biológico
Halógenos Cl, F, Br Hidrógeno H – C  Ramificados 	Insaturados >C=C< Parcialmente oxidados  Uniones de azufre Grupos funcionales que contienen N, S, P y O

**Tabla 4.13.** Factores que determinan la persistencia de productos químicos en el ambiente. (Adaptado de Horne, 1982)

indicador adecuado por su precisión y facilidad de medición en el laboratorio, en contraste con el proceso de análisis de la DBO, cuyos valores se pueden estimar a partir de la demanda bioquímica de oxígeno, así como en algunos casos también se puede estimar el contenido de carbono orgánico total.

Las concentraciones de la DQO en aguas naturales no contaminadas presentan valores de hasta 20 mg O<sub>2</sub>/L y llegan hasta 200 mg O<sub>2</sub>/L cuando los cuerpos de agua reciben efluentes domésticos o industriales. Por otra parte, las aguas de origen industrial pueden tener valores de DQO con valores que oscilan entre 100 y 60 000 mg O<sub>2</sub>/L.

## Sólidos y sólidos suspendidos totales

El término sólidos se usa ampliamente para la mayoría de los compuestos que están presentes en las aguas naturales y que permanecen en estado sólido después de la evaporación (algunos compuestos orgánicos permanecen en estado líquido después de que el agua ha sido evaporada). Los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos disueltos totales (SDT) corresponden a los residuos no filtrables y filtrables, respectivamente; la materia suspendida es una fracción que no pasa a través de un filtro con un diámetro de poro de 0,45 mm (micrómetros). Los sólidos fijos y los sólidos volátiles corresponden al residuo después de secado al horno y calculado como una pérdida para una temperatura dada.

El término residuo seco se aplica a las sustancias que quedan después de la evaporación de una muestra de agua y su subseciente secado en un horno a una temperatura dada. Esto equivale aproximadamente al contenido total de materia disuelta y suspendida, puesto que la mitad del bicarbonato (el anión dominante en la mayoría de las aguas) se transforma en CO<sub>2</sub> durante este proceso.

La determinación del residuo está basada en una medida gravimétrica después de haber seguido un procedimiento apropiado, como por ejemplo, el que incluye filtración, evaporación, secado e ignición. Los resultados de la determinación del residuo dependen de los detalles del procedimiento seguido. Los sólidos suspen-

didos totales se retienen en un filtro estándar y se secan hasta un peso constante a 105°C.

## Turbidez

La turbidez definida, en términos generales, como una mezcla que oscurece o disminuye la claridad natural o transparencia del agua o, en términos más técnicos, como una expresión de la propiedad óptica que causa que la luz se disperse y absorba, en lugar de transmitirse en línea recta a través del agua, es producida por materias en suspensión como arcilla, cieno o materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos. Tales partículas varían en tamaño desde 0,1 hasta 1000 nm (nanómetros) de diámetro. Los resultados de la turbidez se obtienen a partir de la dispersión y absorción de la luz incidente sobre las partículas y están controlados por el tipo y concentración de materia suspendida.

La turbidez de un cuerpo o corriente de agua natural es un factor decisivo para establecer la calidad y productividad de estos sistemas. La mayoría de las aguas superficiales tiene una turbidez importante y, aunque a veces no limita la posibilidad de uso del agua para consumo humano, sí lo hace sobre las calidades química y bacteriológica. Las partículas en suspensión pueden occasionar sabores y olores desagradables, además de que el consumidor sólo usará el agua turbia con reticencia.

La turbidez puede variar con la época del año, la actividad biológica y el transporte de partículas de suelos por escorrentía y/o proceso de erosión. La lluvia intensa provoca variaciones horarias de turbidez. La turbidez puede relacionarse indirectamente con la cantidad de sólidos suspendidos totales.

## Transparencia

La transparencia puede ser medida fácilmente en el campo y, por consiguiente, incluye programas de muestreo regular, especialmente en lagos y represas, con el objeto de obtener una información sobre el nivel de actividad biológica. Este valor se determina por el uso de un disco circular (disco Secchi), que se sumerge en la columna de agua hasta desaparecer a la vista, y se registra esa profundidad mediante el cable que lo sostiene y que está calibrado.

## Color

El color y la turbidez del agua determinan la profundidad a la cual la luz es trasmisita y controlan la cantidad de productividad primaria posible, al controlar la tasa de fotosí-

tesis de las algas presentes. El color visible del agua es el resultado de diferentes longitudes de onda de la luz no absorbidas por el agua y que tienen que ver con las sustancias particuladas presentes. Es posible medir tanto el color aparente como el verdadero: las aguas contienen sustancias minerales naturales, como minerales de hierro, y sustancias orgánicas, como el ácido húmico, que le confieren el color verdadero al agua; el color verdadero sólo puede ser medido en muestras después de filtración o centrifugación.

El color aparente es causado por partículas coloreadas y la refracción y reflexión de la luz sobre las partículas suspendidas. Las aguas contaminadas pueden tener un color aparente intenso. Diferentes especies de fito y zooplancton pueden producir un color aparente: un color oscuro o azul verdoso puede ser causado por algas verde-azules; un color amarillo pardo, por las diatomeas o dinoflagelados, y los rojos y púrpura pueden ser debidos a la presencia de zooplancton, como *Daphnia sp.* o copépodos.

El color puede ser medido por la comparación de muestras de agua con una serie de diluciones de una solución de cloroplatinato de potasio y cloruro cobaltoso. Las unidades se denominan platino cobalto (UPC) y están basadas en una concentración de 1 mg Pt/L; las aguas naturales poseen valores desde menores de 5 UPC hasta 300 UPC.

## Olor

El olor del agua es el resultado de la presencia de compuestos orgánicos volátiles y puede ser producido por fitoplacton y plantas acuáticas en proceso de descomposición; adicionalmente, los residuos industriales y humanos también pueden determinar olores como resultado de la actividad biológica. Los compuestos orgánicos e inorgánicos, los aceites y el gas pueden impartir olor al agua, aunque éstos no indican la presencia de sustancias peligrosas.

La presencia de olor sugiere una actividad biológica alta, pero normal, y es una prueba simple y adecuada para aguas portables. Las temperaturas cálidas incrementan la producción de olor causada por los productos metabólicos, así como el pH que puede afectar la tasa de estas reacciones químicas. El olor puede ser medido en términos de la máxima dilución de una muestra, a la cual definitivamente el olor es perceptible, por métodos como el número umbral de olor (TON) y el índice de intensidad de olor (OII).

## Carbonatos y bicarbonatos

La presencia de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) influencia la dureza y la alcalinidad del agua. El componente  $\text{CO}_2$  procede de la atmósfera y de la respiración

biológica; la meteorización de las rocas contribuye con el aporte de carbonatos y bicarbonatos. En áreas exentas de rocas carbonatadas, estos compuestos proceden exclusivamente de la atmósfera y la degradación de los suelos.

Las cantidades relativas de carbonatos, bicarbonatos y ácido carbónico en las aguas naturales están relacionadas con el pH; el ion predominante es el bicarbonato, resultado de los procesos de meteorización de las rocas y el pH normal de las aguas superficiales (entre 6.5 y 8.5). El carbonato es poco común en las aguas superficiales debido a que el pH nunca es superior a 9, mientras que las aguas subterráneas pueden ser más alcalinas y tener una concentración de carbonato superior a 10 mg/L. La concentración de bicarbonato en las aguas superficiales es menor de 500 mg/L y en general, inferior a 25 mg/L.

La concentración de carbonatos y bicarbonatos puede ser calculada a partir de la alcalinidad libre y total; sin embargo, la validez de los cálculos es sólo para agua pura, ya que se asume que la alcalinidad se deriva de los carbonatos y bicarbonatos; si hay también iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) presentes, como es el caso de algunas aguas no contaminadas o medianamente contaminadas, se pueden afectar los cálculos.

## Dióxido de carbono

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es soluble en agua y es absorbida por ella a través de la interfaz aire-agua; adicionalmente, el  $\text{CO}_2$  se produce dentro de los cuerpos de agua por la respiración de la biota acuática, en procesos aeróbicos por descomposición heterotrófica de la materia orgánica suspendida y sedimentada. El dióxido de carbono disuelto en un agua natural hace parte de un sistema en equilibrio que involucra iones bicarbonato y carbonato, cuya concentración depende del pH.

El  $\text{CO}_2$  es el componente gaseoso en equilibrio con la atmósfera, mientras que el  $\text{CO}_2$  total es la suma de todas las formas inorgánicas del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ). El  $\text{CO}_2$  y el  $\text{HCO}_3^-$  pueden ser incorporados como carbono orgánico por los organismos autotróficos. El  $\text{CO}_2$  comprende las concentraciones de  $\text{CO}_2$  más las de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ; aunque la última forma es mínima en la mayor parte de las aguas superficiales, excediendo difícilmente el pH 9. A altas concentraciones de ácido carbónico (pH 4.5 o más bajo), el agua es corrosiva para los metales y los materiales de concreto, como resultado de la formación de bicarbonato solubles. La capacidad de afectación del componente carbonato de calcio se utiliza como un indicador de la agresividad del ácido carbónico o del  $\text{CO}_2$ , referido como  $\text{CO}_2$  libre.

La determinación del  $\text{CO}_2$  libre se hace por titulación, y el  $\text{CO}_2$  total se calcula a partir del pH y la alcalinidad previamente medidos. El último método está sujeto a interferencias y puede ser inexacto.

## Dureza

Se entiende como dureza de las aguas naturales el contenido total de las sales disueltas de calcio y magnesio; se divide en dureza carbonácea, determinada a través de la evaluación de las concentraciones de los bicarbonatos de calcio y magnesio, y dureza no carbonácea, determinada a través de las sales de calcio y magnesio, provenientes de ácidos fuertes. Los bicarbonatos se transforman durante la ebullición del agua en carbonatos, los cuales a su vez se precipitan, razón por la cual la dureza del carbonato se conoce como temporal o remisible, mientras que la dureza remanente después de la ebullición se denomina constante.

La dureza puede variar en un intervalo amplio de valores. La dureza debida al calcio es la que prevalece, con valores por encima del 70%, aunque en algunos casos la del magnesio puede alcanzar valores comprendidos entre 50 y 60%. La dureza de las aguas subterráneas es menos variable. Cuando hay requerimientos específicos para la dureza del agua, en relación con su uso, es importante referir los cationes que determinan la dureza y sus propiedades.

La dureza general se determina por titulación complejométrica, empleando diferentes indicadores para establecer la dureza general o la debida al calcio; la dureza debida al magnesio se calcula a partir de la diferencia entre las dos determinaciones y la dureza al carbonato se determina por titulación ácido-base. La dureza puede ser determinada a partir de la suma de los iones divalentes, analizados individualmente por otros métodos.

El calcio está presente en todas las aguas como  $\text{Ca}^{2+}$  y se disuelve fácilmente a partir de las rocas y minerales que lo contienen, especialmente calizas y yeso; el primero, como carbonato y el segundo, como sulfato. El calcio es abundante en las aguas superficiales y subterráneas. Las aguas industriales y las procedentes de tratamientos de aguas contribuyen al incremento de calcio en las aguas superficiales. La lluvia ácida puede incrementar el lixiviado del calcio a partir de los suelos.

Los compuestos de calcio son estables en agua cuando el dióxido de carbono está presente, pero su concentración puede caer cuando el carbonato de calcio se precipita debido al incremento de la temperatura del agua, la actividad fotosintética o por la pérdida de dióxido de carbono causada por el incremento de la presión. El calcio es un elemento esencial para todos los organismos y se incorpo-

ra en los exoesqueletos de muchos invertebrados acuáticos y en los huesos de los vertebrados. Las concentraciones de calcio en las aguas naturales son típicamente menores de 15 mg/L, aunque para aguas asociadas con rocas ricas en carbonato, las concentraciones pueden estar entre 30 y 100 mg/L. Las aguas salobres tienen concentraciones de varios cientos de miligramos por litro o más.

El magnesio se encuentra en las aguas naturales como  $Mg^{2+}$  y procede principalmente de la meteorización de las rocas que contienen minerales de ferromagnesio y de las rocas que contienen carbonatos. El magnesio también se presenta como un compuesto organometálico, puesto que es un elemento esencial para los organismos vivos. La concentración natural del magnesio en las aguas puede llegar a más de 100 mg/L, dependiendo del tipo de roca. Aunque el magnesio se usa en muchos procesos industriales, éstos contribuyen relativamente poco al contenido total de magnesio en las aguas superficiales.

## Cloruros

La mayor parte del cloro se presenta como cloruro ( $Cl^-$ ) en solución. Este componente entra a las aguas superficiales por medio de la deposición atmosférica de los aerosoles oceánicos, a partir de la meteorización de las rocas sedimentarias (la mayor parte de ellas son depósitos de sal) y de los efluentes industriales y aguas domésticas, así como por la escorrentía de las zonas agrícolas. Concentraciones elevadas de cloruros hacen en las aguas inservibles para el uso doméstico.

En las aguas superficiales la concentración de cloruros es generalmente más baja de 10 mg/L y en algunas ocasiones, menor de 2 mg/L. Concentraciones más elevadas pueden encontrarse a la salida de las aguas domésticas, en las zonas de drenaje y en las áreas costeras. Las fluctuaciones estacionales de los cloruros en las aguas superficiales están asociadas a las épocas en las que se requiere su conservación a partir de la aplicación de sales, especialmente en el invierno. Como los cloruros están frecuentemente asociados con las aguas domésticas, su incorporación es un indicador de posible contaminación por aguas negras.

## Sulfatos

El sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) se encuentra presente en forma natural en las aguas superficiales, proviene del lavado de los compuestos minerales azufrados, de las rocas sedimentarias, como el yeso y la pirita, y de la deposición atmosférica. El sulfato es la forma más estable del azufre y es fácilmente soluble en agua (a excepción de las sales de plo-

mo, bario y estroncio); las descargas industriales y la precipitación atmosférica pueden agregar cantidades significativas de sulfatos a las aguas superficiales. Los sulfatos pueden ser usados como fuente de oxígeno por bacterias, que los convierten en sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ , HS) en condiciones anaeróbicas.

La concentración de sulfatos en aguas naturales está comprendida entre 2 y 80 mg/L, aunque pueden alcanzar valores de hasta 1000 mg/L muy cerca a las descargas industriales o en regiones áridas en donde existen minerales de sulfato, como el yeso. Concentraciones elevadas, superiores a 400 mg/L, pueden hacer inservible el agua para consumo humano.

## Sulfuros

Los sulfuros penetran a las aguas subterráneas como resultado de la descomposición de los minerales y de los gases volcánicos. La formación de sulfuros en las aguas superficiales se da por procesos anaeróbicos, en los que las bacterias actúan sobre sustancias orgánicas en sedimentos profundos de lagos y reservorios. La materia en suspensión puede contener sulfuros metálicos y en sedimentos profundos, incluso no contaminados, se evidencian trazas de sulfuro provenientes de la degradación de los vegetales; pero en concentraciones altas son indicativas de la presencia de vertimientos de aguas domésticas o industriales. Bajo condiciones aerobias el ión sulfuro se transforma rápidamente en azufre y en iones sulfato.

Los sulfuros disueltos existen en el agua como moléculas no ionizadas ( $H_2S$ ), hidrosulfuro (HS) y, muy ocasionalmente, como sulfuro ( $S^{2-}$ ); el equilibrio entre estas formas es una función del pH, y las concentraciones de sulfuro no necesitan ser consideradas si el pH es más bajo que 10. Cuando la concentración de sulfuros es apreciable, se presentan condiciones de olor fuerte y tóxicas, que las hacen inadecuadas para consumo humano y otros usos.

## Sílice

Los silicatos están ampliamente distribuidos en la superficie terrestre y en las aguas subterráneas; existen disueltos en agua, suspendidos y en estado coloidal. El disuelto está representado por el ácido silícico, los productos de dissociación y asociación y los compuestos organosilícicos. La sílice reactiva –principalmente el ácido silícico, registrado comúnmente como sílice disuelta ( $SiO_2$ ) o algunas veces, como ácido silílico ( $H_4SiO_4$ )– proviene de la meteorización química de minerales silíceos.

La sílice puede ser descargada en cuerpos de agua con las aguas residuales domésticas y las aguas residuales de

industrias, especialmente en aquéllas que utilizan compuestos de sílice, como la industria cerámica, la vidriería y la manufactura de productos abrasivos. La sílice es un elemento esencial para algunas plantas acuáticas, especialmente las diatomeas, que lo incorporan durante el crecimiento celular y lo liberan durante su descomposición, generando fluctuaciones en la concentración, especialmente en lagos.

El contenido de sílice en ríos y lagos varía entre 1 y 30 mg/L, en tanto que las concentraciones en aguas subterráneas y volcánicas son mayores y las aguas térmicas pueden alcanzar concentraciones hasta de 1000 mg/L o más. En aguas débilmente mineralizadas de las regiones árticas, en aguas estuarinas y en aguas coloreadas, la sílice reactiva puede alcanzar valores equivalentes a 50% de los sólidos disueltos totales.

## Nutrientes

Los nutrientes, compuestos necesarios para los procesos bioquímicos de los organismos acuáticos, son derivados químicos inorgánicos del nitrógeno y del fósforo. Los nutrientes así definidos tienen significado ambiental si se tiene en cuenta dos consideraciones básicas: la primera, los ciclos biogeoquímicos de los elementos nitrógeno y fósforo, cada uno de ellos en sus diferentes formas químicas, muchas de las cuales están asociadas a los diferentes grados de oxidación –nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y pirofosfatos– y pueden estar presentes dependiendo de las condiciones particulares del recurso hídrico. La otra, originada por los procesos químicos y bioquímicos implicados en la transformación de las sustancias químicas dispuestas por las actividades de origen antrópico, como los vertimientos de efluentes industriales, domésticos, agrícolas (plaguicidas, fertilizantes) y relaves de las industrias extractivas (minería).

Cuando se exceden los intervalos de concentración natural de estos nutrientes en los sistemas acuáticos naturales, se producen alteraciones, como pérdida del oxígeno disuelto, proliferación de especies acuáticas indeseables, hasta llegar finalmente a las condiciones de anoxia y pérdida total del oxígeno, que se manifiesta por expulsión de gases tóxicos, como el sulfuro de hidrógeno, de olor característico a huevos descompuestos.

## Metales pesados

Los metales pesados son elementos metálicos de alto peso atómico (mercurio, cobre, cromo, cadmio, arsénico y plomo); es un término colectivo general aplicado al grupo de metales y metaloides con una densidad atómica

mayor de 6 g/cm<sup>3</sup>. Aunque es un término definido con inexactitud es ampliamente reconocido y aplicado a elementos tales como cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), comúnmente asociados con problemas de contaminación y toxicidad. Un nombre alternativo y teóricamente más aceptable para este grupo de elementos es metales traza (metales encontrados generalmente en concentraciones muy bajas en relación con otros metales, como hierro, aluminio, magnesio, etc.), aunque no es tan ampliamente utilizado.

Los metales pesados están involucrados en los ciclos biogeoquímicos; sus concentraciones ambientales en el recurso hídrico son del orden de los miligramos o microgramos por litro de agua y sus variaciones dependen de las características geoquímicas de las regiones por donde las aguas transcurren. En bajas concentraciones pueden perjudicar a los seres vivos y tienden a acumularse en la cadena alimenticia. Están presentes también en los combustibles fósiles y, por tanto, son contaminantes de la atmósfera por los procesos de combustión industrial.

Las concentraciones de los metales pesados por encima de los intervalos conocidos para las aguas naturales pueden deberse a los vertimientos de los efluentes industriales. Las concentraciones de estos elementos superiores a determinados valores –obtenidos a través de experimentos con organismos acuáticos (bioensayos)– tienen efectos sobre la biota acuática al incorporarse en la cadena trófica (fitoplancton, zooplancton, peces, aves, hombre), repercutiendo en la salud pública, en la biodiversidad y en la posibilidad de uso del agua.

La capacidad de las aguas naturales para soportar la vida acuática y su sostenibilidad para otros usos depende de la presencia de muchos metales traza. Algunos metales –como manganeso, zinc y cobre–, cuando se encuentran en concentraciones traza, son importantes para las funciones fisiológicas de los tejidos vivos y para la regulación de muchos procesos bioquímicos. Sin embargo, cuando estos metales se descargan en las aguas naturales, incrementando su concentración, pueden tener efectos toxicológicos graves sobre los humanos y los ecosistemas acuáticos.

La contaminación de aguas por metales pesados es el resultado de actividades antrópicas, que determinan problemas ecológicos severos en muchas partes del mundo. Esta situación es agravada por la dificultad de su eliminación natural. Como resultado, los metales cambian de un compartimiento a otro, incluyendo la biota, frecuentemente con efectos graves. Cuando la acumulación de metales en la biota ocurre a través de la cadena alimenticia, hay también un incremento del riesgo toxicológico

para los humanos. Como resultado de la absorción y acumulación, la concentración de metales en los sedimentos de fondo es mucho mayor que en el agua, provocando problemas de contaminación secundaria.

Generalmente las cantidades traza de metales están presentes en las aguas superficiales, debido a la meteorización de las rocas y de los suelos. En el caso de los países desarrollados, las descargas industriales y mineras son las principales fuentes de metales traza en las aguas superficiales; el plomo, como principal aditivo en derivados del petróleo, se emite a la atmósfera a través de los gases de escape de los automóviles e ingresa al ciclo hidrológico por deposición aérea en forma de partículas o arrastrado por la lluvia.

La toxicidad de los metales en el agua depende del grado de oxidación del ión metálico y de las formas en las cuales se encuentra. Como regla general, la forma iónica de los metales es la más tóxica; no obstante, su toxicidad se reduce cuando están en forma de complejos, por ejemplo, con materia orgánica natural, como los ácidos fulvicos y húmicos.

## Plaguicidas

Los plaguicidas son sustancias o mezclas de sustancias que previenen, destruyen, repelen o mitigan cualquier peste. También son cualquier sustancia o mezcla usada como regulador, defoliante o desecante de plantas. Pueden clasificarse químicamente en tres grupos: inorgánicos, orgánicos naturales y orgánicos sintéticos; estos últimos clasificados en organoclorados, organofosforados y carbamatos. Por su utilidad biológica se pueden clasificar en insecticidas, algicidas, fungicidas y herbicidas.

Los plaguicidas, que constituyen una herramienta importante en el desarrollo de la agricultura porque permiten el incremento de la producción, se utilizan generalmente para combatir insectos, malezas y hongos en diferentes tipos de cultivos; sin embargo, pueden acumularse en la cadena alimenticia y/o contaminar el medio ambiente, si se emplean equivocadamente. La evaluación de los efectos de los plaguicidas sobre los ecosistemas y la salud humana son la causa principal de la necesidad de establecer su presencia en el recurso hídrico como un indicador del deterioro de la calidad del agua.

## Calidad del recurso hídrico en Colombia

Las fuentes principales de alteración de la calidad del recurso hídrico en el país son:

- Aguas residuales domésticas: caracterizadas principalmente por contener sustancias biodegradables y compuestos químicos domésticos, como detergentes, compuestos de cloro y microorganismos patógenos.
- Aguas residuales industriales: contienen sales de metales pesados, como sulfatos, cloruros o nitratos de plomo, cromo, cadmio, mercurio, entre otros, y compuestos orgánicos sintéticos, como derivados halogenados del petróleo.
- Aguas residuales de producción agrícola y ganadera (contaminación difusa): contienen fertilizantes, como nitratos y fosfatos, sales de potasio y plaguicidas.
- Aguas lluvias: arrastran compuestos azufrados y nitrogenados presentes en la atmósfera, debidos a los procesos de combustión en la industria y a la generación de energía (termoeléctricas).
- Transporte terrestre, fluvial y marítimo de sustancias peligrosas y de petróleo y sus derivados: accidentalmente son derramados en cuerpos de agua.
- Obras de infraestructura: incrementan el transporte de sedimentos.
- Aguas de lavado de los procesos de extracción mineral: cianuros, mercurio.
- Residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios o directamente en cuerpos de agua: incrementan la demanda de oxígeno en los procesos de oxidación de los materiales en el agua.

La densidad poblacional y la producción industrial se han establecido tradicionalmente en las áreas de influencia de las principales ciudades de Colombia, localizadas en la zona Andina, con la consecuente presión sobre los recursos hídricos de las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca. Sin embargo, los afluentes de los citados ríos reciben la mayor carga de alterógenos de la calidad del recurso hídrico (*tabla 4.14*).

Sobre una población total aproximada de 35 millones, se estima que cerca de un 12% vive en la región costera. Las áreas costeras presentan principalmente contaminación por desechos domésticos e industriales. La mayoría de las descargas domésticas no están sujetas a tratamiento y son vertidas directamente a las aguas costeras o a los ríos, en especial a la cuenca hidrográfica del Magdalena, cuya extensión es de 256.622 km<sup>2</sup> y, a su vez, constituida por 31 ríos principales, de los cuales el Cauca y el Bogotá son los mayores receptores de toda índole de contaminantes. La contaminación por petróleo es moderada, pero en algunas localidades es crítica debido a derrames ocasionales de crudo por accidente de los buques cargueros.

Los plaguicidas utilizados en el tratamiento de cultivos en los suelos adyacentes a la línea de costa se diluyen

Principales fuentes de materia orgánica	
Fuente de contaminación	Cuenca afectada
Bogotá	Sabana de Bogotá
Medellín-Valle de Aburrá	Medio Cauca
Cali-Jumbo	Alto Cauca
B/quilla-Cartagena-Sta. Marta	Bajo Magdalena
Bucaramanga	Sogamoso
Manizales	Medio Cauca
Pereira	Medio Cauca
Cúcuta	Catatumbo
Tunja	Sogamoso
Pasto	Patía
Aportes de fertilizantes y plaguicidas	
Áreas potenciales de contaminación	Cuenca afectada
Zona Ciénaga-Fundación	Bajo Magdalena
Zona Cesar-Guajira	Río Cesar
Córdoba	Río Sinú
Altiplano de Rionegro	Medio Cauca
Valle del Zulia	Catatumbo
Alto Chicamocha	Sogamoso
Altiplano Cundiboyacense	Sabana de Bogotá
Llanos del Tolima	Alto Magdalena
Piedemonte llanero	Meta-Guaviare
Cauca y Valle del Cauca	Alto Cauca
Llanos del Huila	Alto Magdalena
Altiplano de Nariño	Patía
Valle de Sibundoy	Putumayo
Zona de Ábrego	Catatumbo
Aporte de hidrocarburos y sustancias químicas	
Fuente de contaminación	Cuenca afectada
Refinería de Barrancabermeja	Medio Magdalena
Refinería de Cartagena	Mar Caribe
Oleoducto Caño Limón-Coveñas	Catatumbo, Arauca, Bajo Magdalena
Oleoducto central de los Llanos	Meta, Medio y Bajo Magdalena
Oleoducto Orito-Tumaco	Putumayo, Patía, Mira

**Tabla 4.14.** Aporte de materia orgánica, fertilizantes y plaguicidas e hidrocarburos y sustancias químicas. (Fuente: IDEAM)

en el ambiente costero marino y localmente llegan a presentar valores significativos. La contaminación por estos alterógenos, aunque no se conoce su magnitud, se encuentra extendida en un 80% del Caribe colombiano. La alteración térmica del medio marino es local y coincide con los centros industriales (Cartagena, Mamonal) y las termoeléctricas (costas de los departamentos de Bolívar, Atlántico y Guajira). Concentraciones moderadas

a críticas de metales pesados en aguas, sedimentos y organismos se han evidenciado en localidades afectadas por el impacto industrial y agrícola (bahía de Cartagena, bocas de Ceniza, Ciénaga Grande de Santa Marta).

La industria nacional tiene su mayor peso ponderado en el sector de alimentos que, con sus efluentes líquidos con alto contenido de materia orgánica, contribuyen, junto con la carga orgánica doméstica, a los procesos de alteración de la calidad del recurso hídrico, máxime si se considera que es muy bajo el porcentaje de industrias que aplican procesos de tratamiento de sus residuos antes del vertimiento. Esta industria alimenticia está ampliamente distribuida en el territorio colombiano, incluyendo sistemas de producción artesanal.

La industria cementera modifica el recurso hídrico por el vertido de sólidos suspendidos. Esta industria se ubica principalmente en los corredores industriales: Santa Marta-Barranquilla-Cartagena; Bogotá-Soacha; Cali-Yumbo; Sogamoso-Duitama-Tunja; Medellín-Valle de Aburrá y Manizales-Pereira.

La industria petroquímica y carboquímica genera problemas al incorporar compuestos químicos complejos al recurso hídrico. Adicionalmente, el sistema de conducción –oleoductos y gasoductos– es vulnerable y los derrames de crudo modifican negativamente la calidad del agua y, por ende, de la biota allí presente (una parte se dispersa como una película superficial, obstruyendo el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el agua, adhiriéndose a las plantas y a los animales y dificultando los respectivos procesos de fotosíntesis y respiración; otra parte se puede depositar en el fondo de los cauces de agua afectando de manera directa a la flora y la fauna bentónica, entre otros efectos).

El sector manufacturero incluye la industria química, que emite especies químicas resistentes a la biodegradación. La industria química y manufacturera se desarrolla en los corredores industriales y sus vertimientos afectan las corrientes hídricas adyacentes (ríos Bogotá, Cali, Manzanares, Saldaña, Medellín, etc.). Por el efecto tóxico y sus características letales y acumulativas, es de particular importancia considerar los efluentes de las industrias de curtidores, plantas de soda-cloro, producción de baterías y galvanoplastia. Las industrias farmacéutica, de plásticos y de productos de síntesis contribuyen a los procesos de degradación del recurso hídrico por el aporte de sustancias difícilmente biodegradables.

La industria de extracción de petróleo y de metales preciosos e industriales genera, a través de las aguas de relave de sus minas y de las operaciones de extracción, cantidades importantes de metales, hidrocarburos, partículas de carbón y sedimentos que se distribuyen difusa-

mente en el recurso hídrico, transportándose muchas veces a distancias considerables de los puntos de emisión.

## Registro histórico de la calidad del agua en Colombia

La calidad del recurso hídrico en el país se ha obtenido por la evaluación cuantitativa de algunos parámetros químicos y físicos, como la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, la demanda química de oxígeno y la turbidez, medidos en 348 localidades de la red hidrológica, ubicadas en 169 corrientes y/o cuerpos de aguas de las cuencas hidrográficas colombianas, representados en el *mapa 4.9*. En los *mapas 4.10 a 4.15* se representan los valores promedios obtenidos con los registros históricos del Ideam para las mediciones de temperatura, pH, conductividad eléctrica, déficit de oxígeno, DQO y turbidez. Debe tenerse presente que estos mapas son producto de una interpolación a partir de datos puntuales en tiempo y espacio, obtenidos en cada sitio de monitoreo, pero que facilitan la visualización de las condiciones generales del recurso hídrico. Resulta evidente que en la medida en que se cuente con una mayor densidad de los sitios de monitoreo, se puede hacer una aproximación mucho más verídica del comportamiento general del recurso hídrico.

### Temperatura

La temperatura del agua superficial promedio entre 1986 y 1999, representada en el *mapa 4.10*, caracteriza tres zonas principales claramente definidas y acordes con las características de relieve del territorio colombiano:

- La alta montaña del Macizo Colombiano y de las cordilleras Oriental y Central en la cercanía de los nevados, con temperaturas promedio entre 10 y 20°C.
- Los valles de las cuencas alta y media de los ríos Cauca y Magdalena, la vertiente del Pacífico y las corrientes que descienden de la Sierra Nevada de Santa Marta, con valores entre 20 y 25°C.
- La cuenca baja del río Magdalena, la Amazonia y los llanos Orientales, con valores entre 25 y 30°C. En esta última región se destaca la zona de Atlántico y Bolívar, comprendida entre el mar Caribe, el río Magdalena y el canal del Dique, con temperaturas promedio mayores de 30°C.

### pH

El *mapa 4.11* muestra que las corrientes de agua superficial de la zona Andina y las vertientes del Pacífico y el

Caribe han registrado, en más del 90% del territorio, valores promedio de pH entre 6 y 8, correspondientes a valores neutros y usuales para aguas naturales, evidenciando la capacidad de amortiguación natural que presentan las corrientes de agua superficial.

Se alejan de este comportamiento algunas regiones de las cuencas del Bajo Cauca, el San Jorge y el Sinú, presentando características ligeramente ácidas con valores de pH entre 5 y 6. Las regiones de la Amazonia y la Orinoquia presentan en más de un 80% de su extensión valores de pH ligeramente ácidos, entre 5 y 6, con algunos valores promedios de pH entre 4 y 5, reflejando en términos generales la influencia de las características geológicas de esta región.

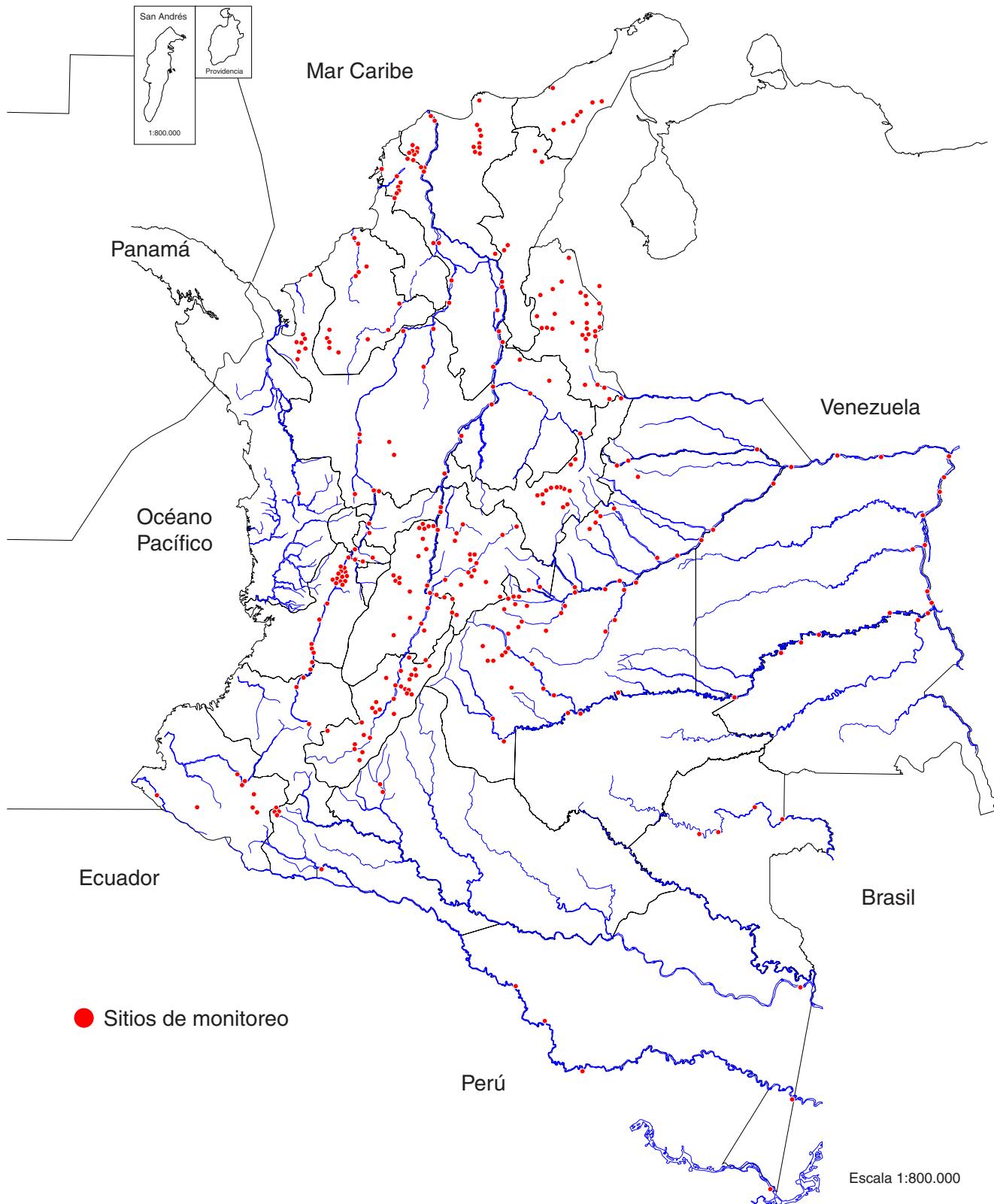
Se presentan condiciones alcalinas en el río Bogotá, entre los municipios de Villapinzón y Chocontá, con valores promedio de pH superiores a 9, causados por los vertimientos industriales, y la zona comprendida entre el canal del Dique y el río Magdalena, con valores entre 8 y 9, calificados como moderadamente alcalinos.

En los *gráficos 4.48 y 4.49* se hace una representación lineal de los valores promedio de pH, obtenidos en los puntos de monitoreo a lo largo de los ríos Magdalena y Cauca, respectivamente. Se observa, en ambos casos, el estrecho intervalo de variación del pH siempre con valores neutros, evidenciando la capacidad tampón de estas corrientes, como se explicó más arriba.

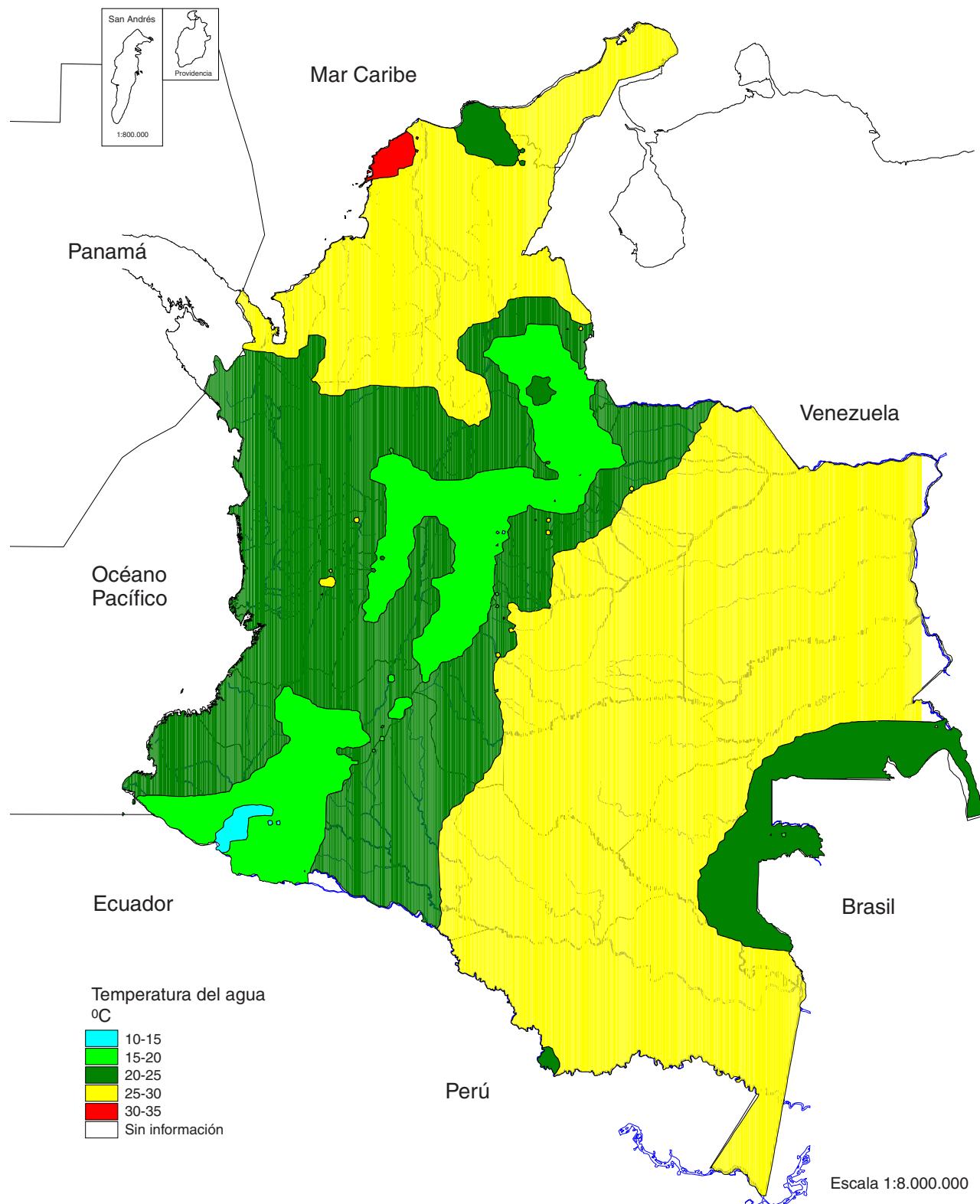
### Conductividad eléctrica

El *mapa 4.12* muestra los resultados promedio de conductividad eléctrica de los monitoreos, efectuados entre 1986 y 1999. En general, más del 80 % de las corrientes de agua que surcan el territorio nacional presentan valores inferiores a 200 mS/cm, indicando un contenido bajo o moderado de sales disueltas. Este comportamiento es especialmente notorio en toda la extensión de la Amazonia, la Orinoquia y la Sierra Nevada de Santa Marta, así como en la vertiente del Pacífico, la cuenca del Catatumbo y buena parte del Magdalena Medio.

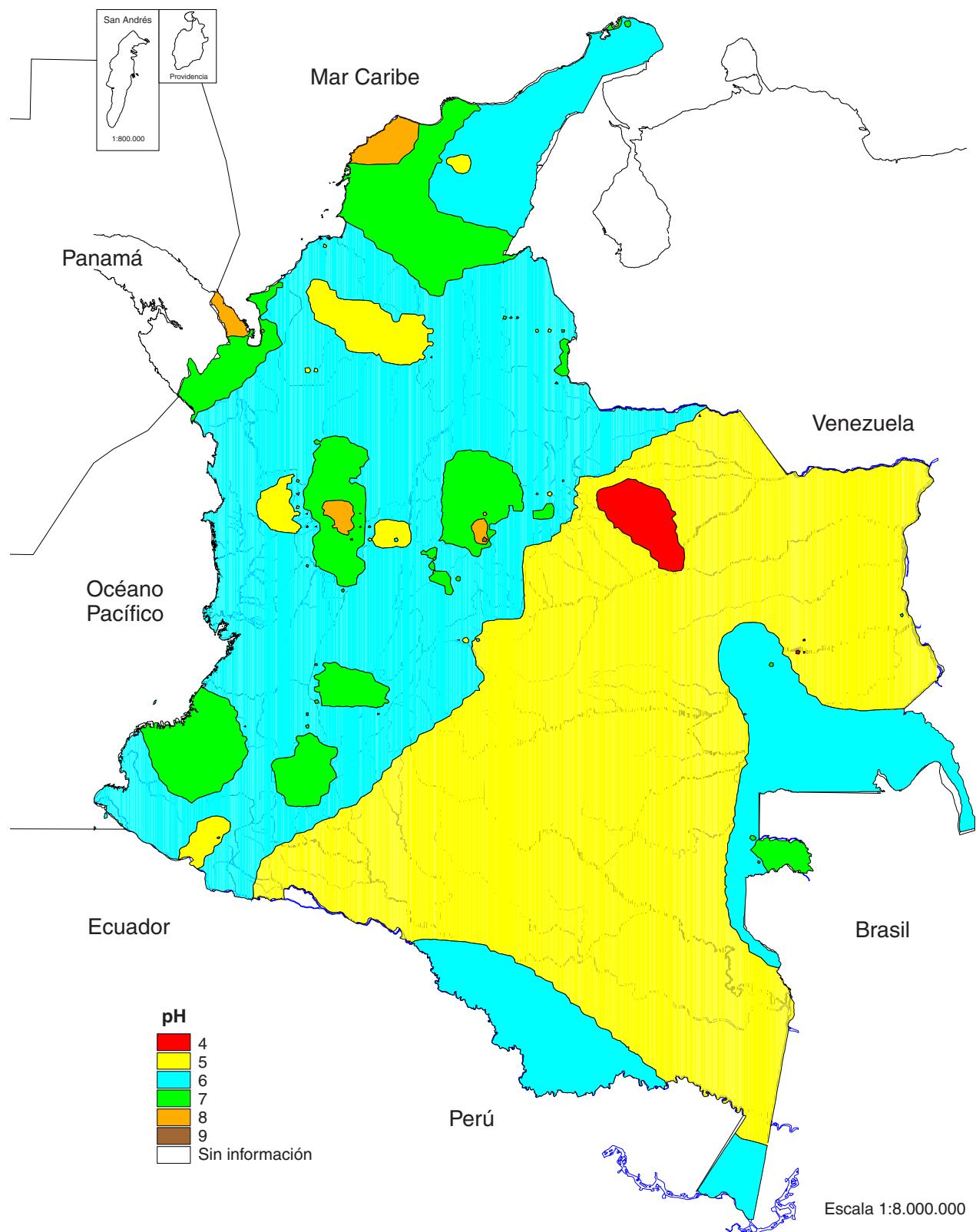
Con valores de conductividad entre 200 y 600 mS/cm, se encuentran las cuencas de los ríos Bogotá, Chicamocha-Sogamoso, Bajo Magdalena, Cauca Medio y la vertiente del Caribe. Los valores atípicos de conductividad, posiblemente influenciados por los vertimientos de origen doméstico e industrial, se encuentran en el río Bogotá, el Chicamocha y algunos de sus tributarios en Boyacá, la zona costera del Urabá y el tramo final del río Magdalena, en el departamento de Atlántico, con valores incluso superiores a 1 000 mS/cm. En estas dos últimas regiones la conductividad eléctrica evidencia además la interacción que



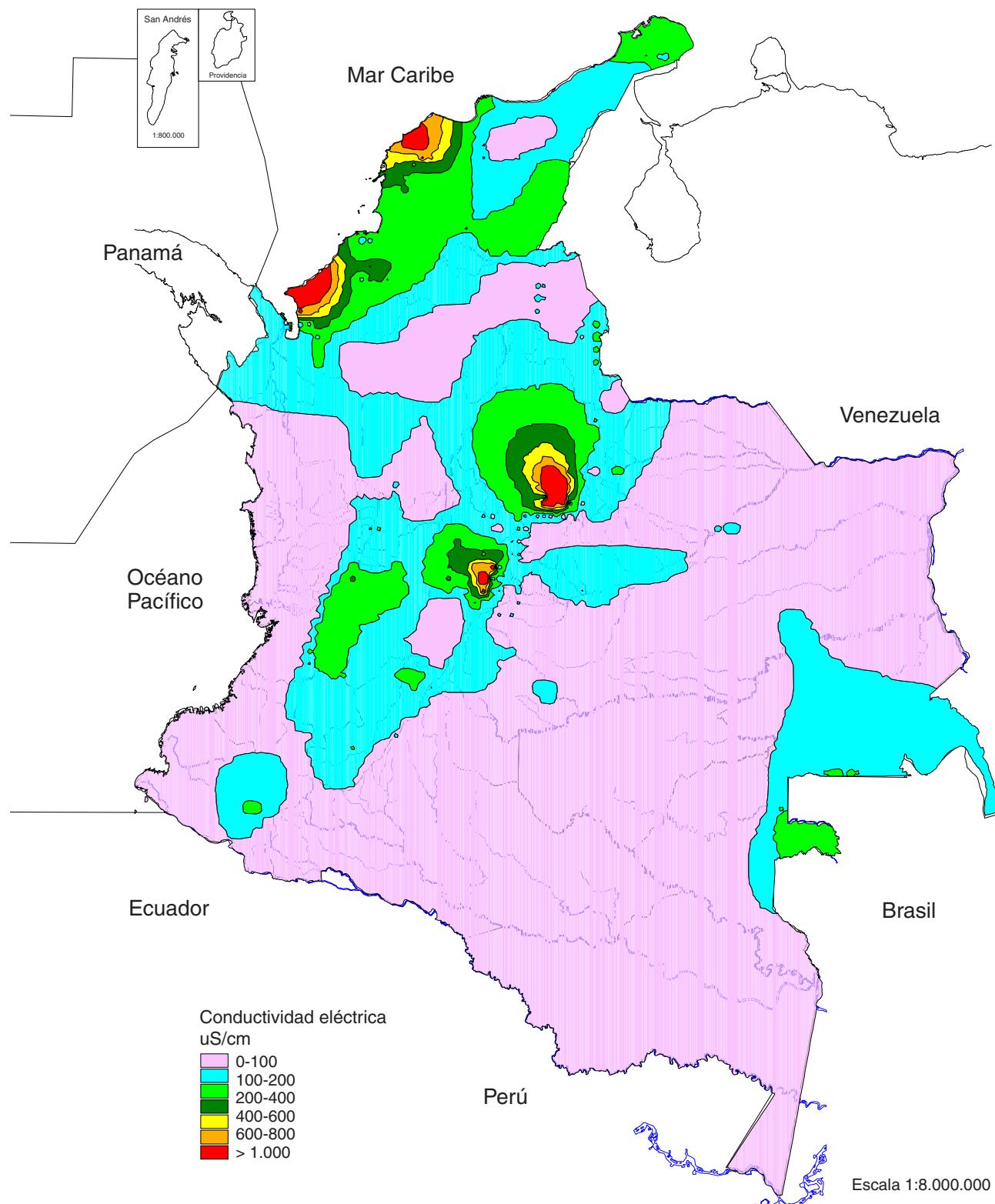
**Mapa 4.9.** Calidad del recurso hídrico superficial. Sitios de monitoreo, 1976-1999. (Fuente: IDEAM)



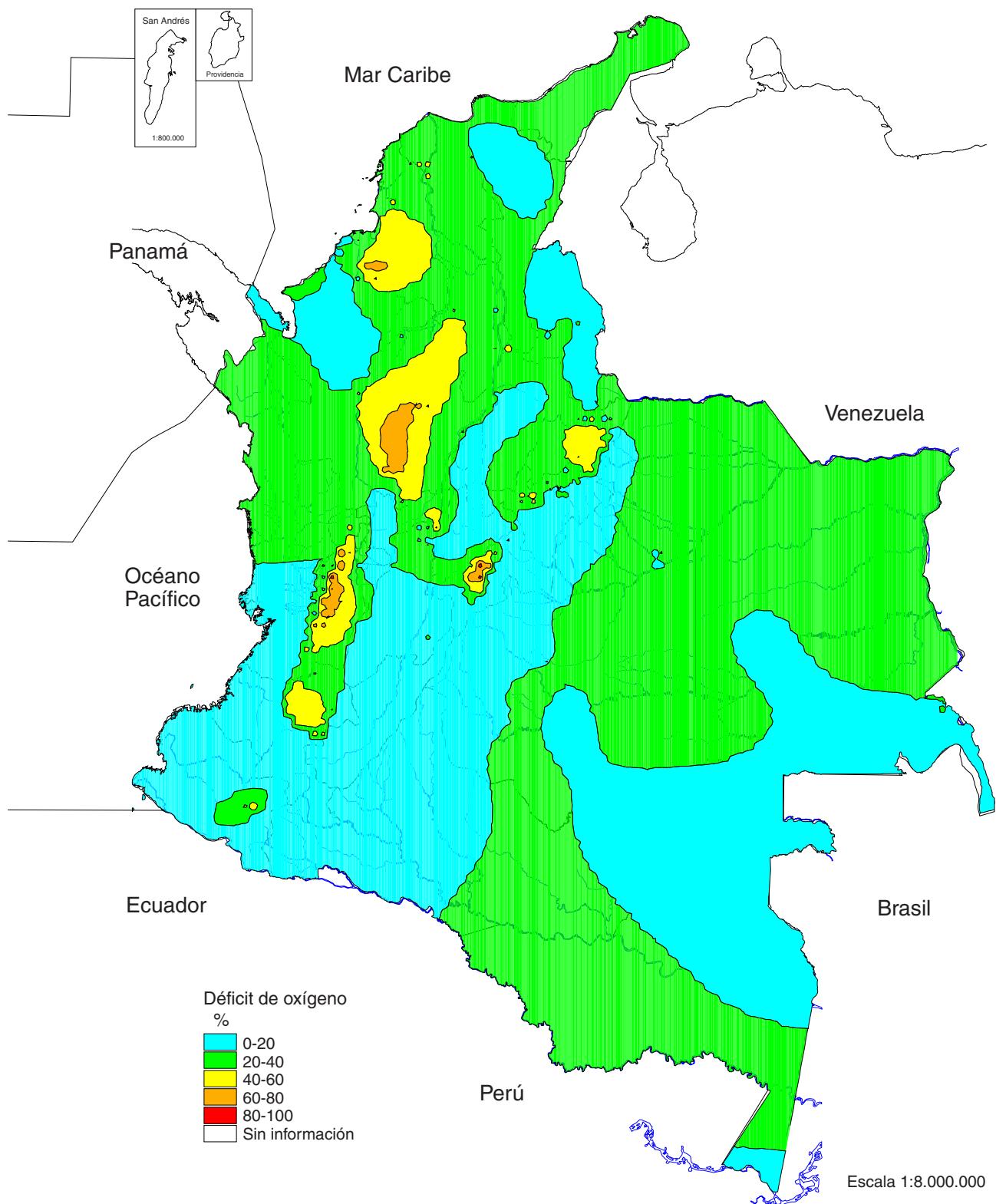
**Mapa 4.10.** Calidad del recurso hídrico superficial. Temperatura promedio 1986-1999. (Fuente: IDEAM)

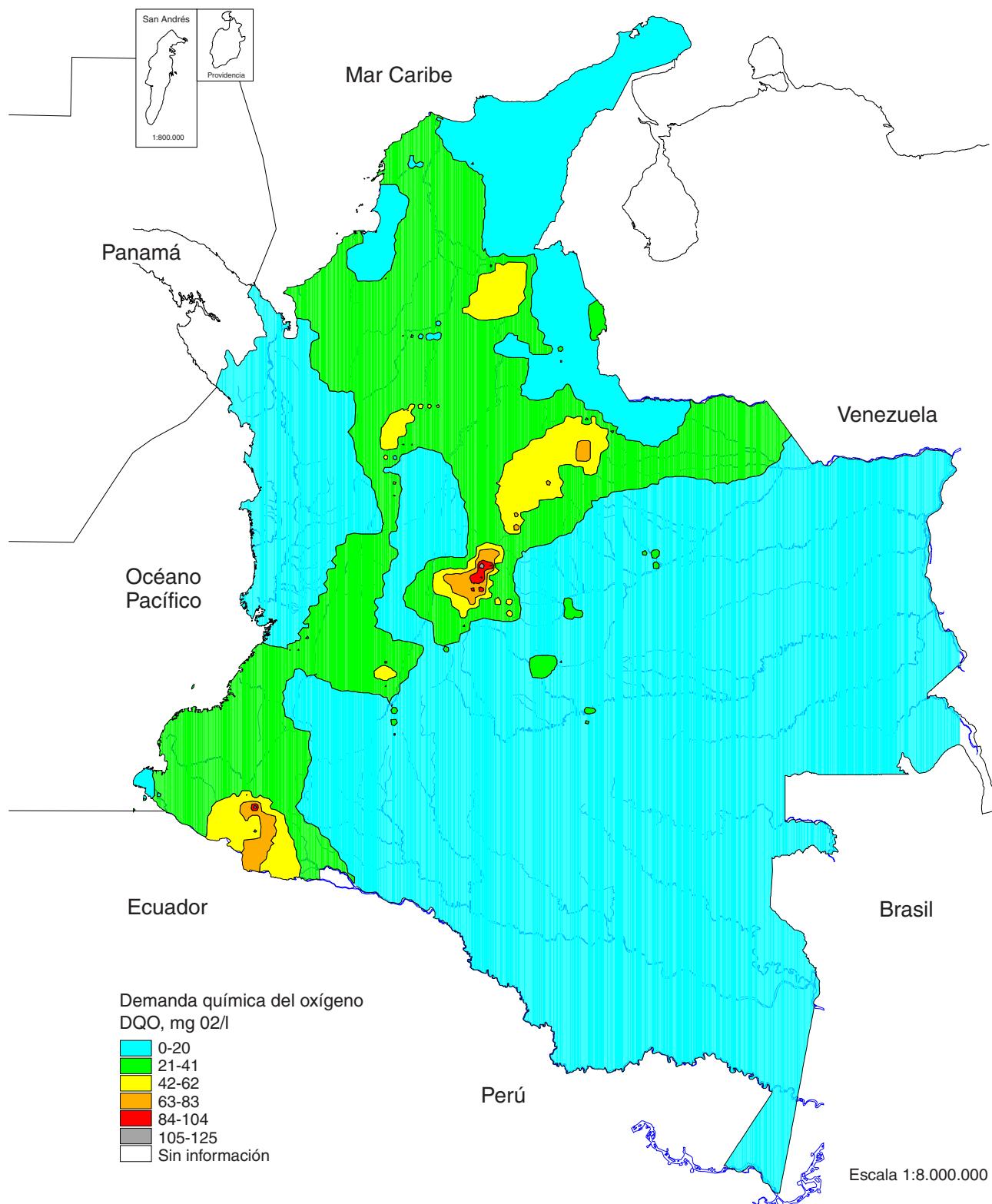


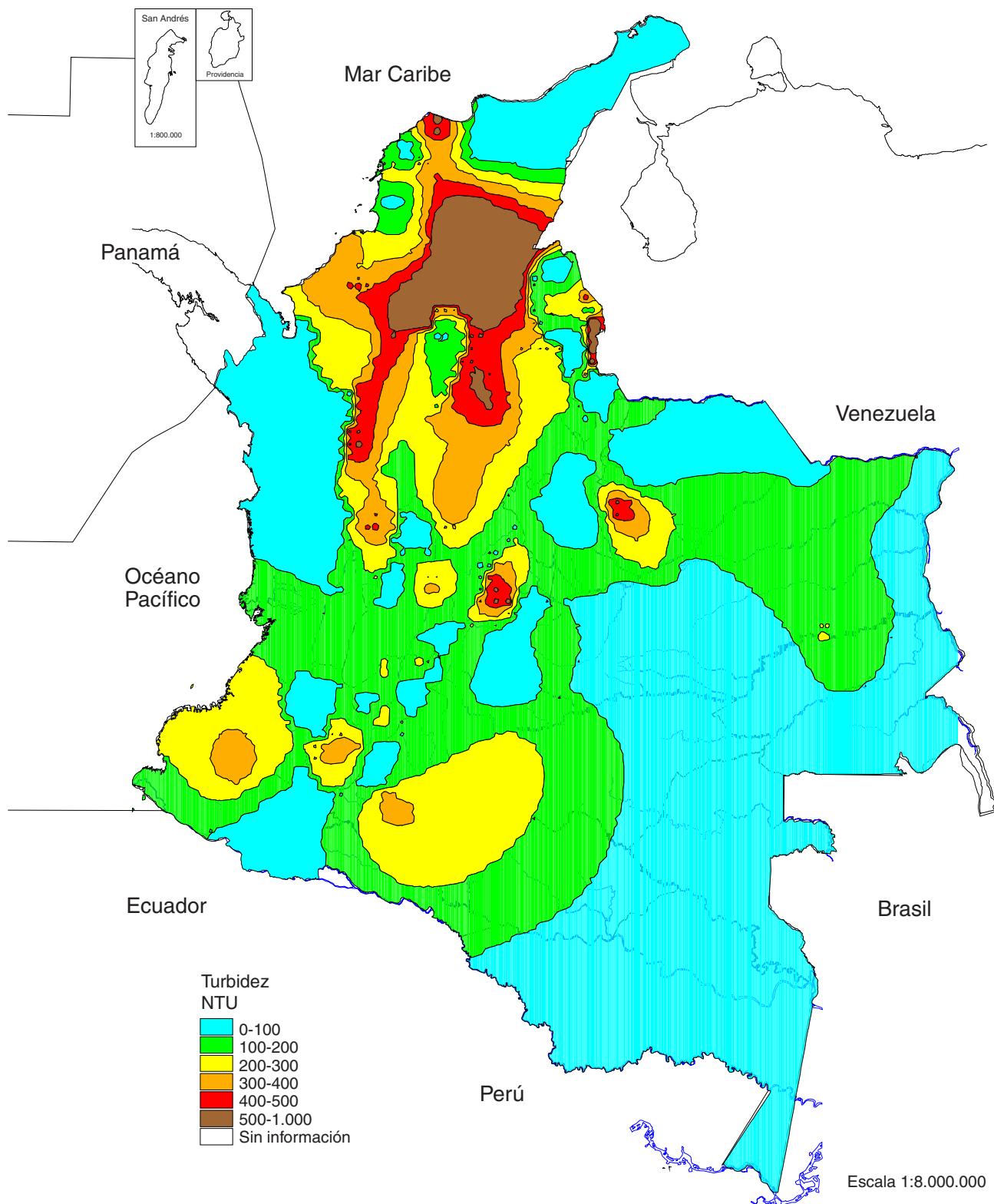
**Mapa 4.11.** Calidad del recurso hídrico superficial, pH potencial de hidrógeno, promedio 1976-1999. (Fuente: IDEAM)



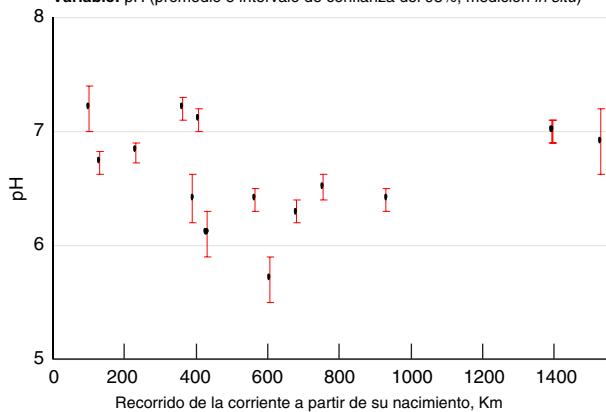
**Mapa 4.12.** Calidad del recurso hídrico superficial. Conductividad eléctrica promedio 1986-1999. (Fuente: IDEAM)



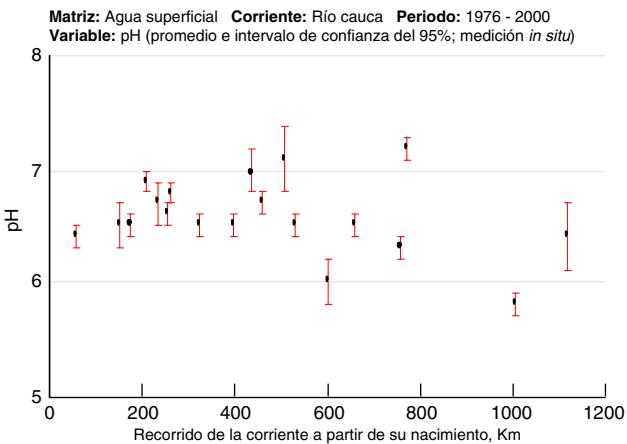




**Matriz:** Agua superficial **Corriente:** Río Magdalena **Período:** 1976 - 2000  
**Variable:** pH (promedio e intervalo de confianza del 95%; medición *in situ*)



**Gráfico 4.48** Variación del pH a lo largo del río Magdalena.  
(Fuente: IDEAM)



**Gráfico 4.49** Variación del pH a lo largo del río Cauca.  
(Fuente: IDEAM)

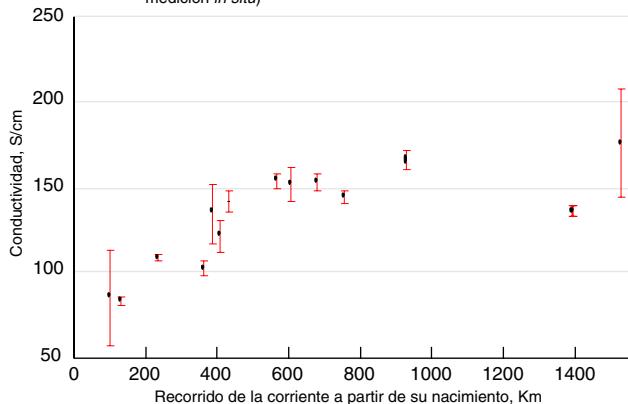
se presenta con el sistema marino (cuñas de agua salina) y el arrastre y la deposición de sales a través de la atmósfera, mediante el viento y la lluvia.

En los gráficos 4.50 y 4.51 se hace una representación lineal de los valores promedios de conductividad eléctrica, obtenidos en los puntos de monitoreo a lo largo de los ríos Magdalena y Cauca, respectivamente. En ambos casos, y como un indicador del transporte de sales disueltas, se observa el aumento progresivo de la conductividad a medida que avanza la corriente, aunque sin superar valores de 200 mS/cm. Se presentan algunas ‘ondulaciones’ de conductividad, debidas muy probablemente al efecto que causan los afluentes (por dilución o descarga de vertimientos) y a las características del suelo que puede lixivar por escorrentía algunas sales presentes en ellos.

## Déficit de oxígeno

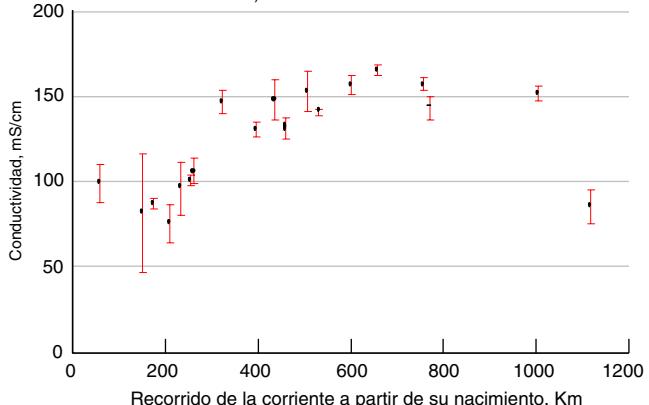
De acuerdo con el mapa 4.13, aproximadamente 90 % de los registros de oxígeno disuelto en el territorio de Colom-

**Matriz:** Agua superficial **Corriente:** Río Magdalena **Período:** 1976 - 2000  
**Variable:** Conductividad (promedio e intervalo de confianza del 95%; medición *in situ*)



**Gráfico 4.50** Variación de la conductividad eléctrica a lo largo del río Magdalena.  
(Fuente: IDEAM)

**Matriz:** Agua superficial **Corriente:** Río Cauca **Período:** 1976 - 2000  
**Variable:** Conductividad (promedio e intervalo de confianza del 95%; medición *in situ*)



**Gráfico 4.51** Variación de la conductividad eléctrica a lo largo del río Cauca.  
(Fuente: IDEAM)

bia corresponde a valores de déficit de oxígeno inferiores a 40%, lo que significa buenas condiciones de oxigenación y baja alteración del recurso, siendo principalmente las corrientes que descienden de las cordilleras Oriental y Central las que presentan mejores condiciones de oxigenación, con déficit inferiores a 20%. Esto también evidencia la buena capacidad de recuperación de las corrientes, en términos de su potencial de degradación de la materia orgánica, aportada por los vertimientos de aguas residuales de los centros poblados, gracias a la oxigenación causada por la velocidad y pendiente de las corrientes de agua en la zona montañosa.

En algunas regiones de la Amazonía, la Orinoquia y la cuenca del río Atrato, donde no es muy fuerte la presión sobre el recurso hídrico causada por vertimientos domésticos, los valores se encuentran entre 20 y 40 %, debido probablemente a la presencia de materia orgánica proveniente del ciclo natural de descomposición de la biota y al arrastre de sedimentos, que generalmente tie-

nen considerables contenidos de sustancias fácilmente oxidables, como el hierro feroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ).

Las zonas que presentan valores de déficit de oxígeno superiores a 60% corresponden a los ríos Bogotá, Cauca y Medellín, en las áreas de influencia de las descargas de vertimientos domésticos e industriales de Bogotá–Soacha, Cali–Yumbo y Medellín–Valle de Aburrá, respectivamente. Estos valores representan condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno) causadas por las descargas de materia orgánica y sustancias oxidables, todas las cuales consumen el oxígeno disuelto en su proceso de estabilización por oxidación. Cuando una corriente presenta estas condiciones, se favorecen los procesos anaeróbicos, en los que el carbono de la materia orgánica es degradado a metano ( $\text{CH}_4$ ), el nitrógeno orgánico, el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) son convertidos en amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) y las especies azufradas, como sulfato y azufre de la materia orgánica, en sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ); este último, principal responsable de los malos olores.

En los gráficos 4.52 y 4.53 se hace una representación lineal de los valores promedio de déficit de oxígeno, registrados en los puntos de monitoreo a lo largo de los ríos Magdalena y Cauca, respectivamente. En estos gráficos la línea de trazos indica el déficit de oxígeno correspondiente a 4 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , como indicador general de las condiciones que facilitan la supervivencia de los peces.

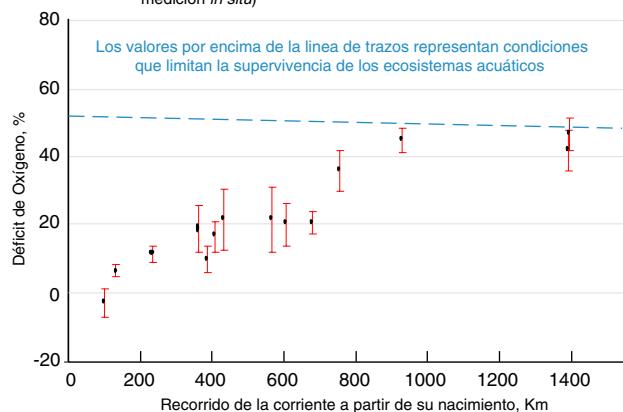
En el río Magdalena no se presentan registros que superen este valor, aunque en la parte baja (entre Sitio Nuevo y Las Flores) hay un considerable aumento del déficit de oxígeno. En el río Cauca, por el contrario, los registros superan el valor límite en seis puntos de monitoreo, ubicados aguas abajo del corredor industrial de Cali–Yumbo, como indicadores de la fuerte presión que soporta este tramo de la corriente por las descargas de materia orgánica y/o sustancias fácilmente oxidables, que consumen oxígeno disuelto en su proceso de degradación y oxidación. Este comportamiento es un buen ejemplo de la capacidad de autodepuración que presentan las corrientes de agua superficial, aunque afecta las condiciones naturales en un buen recorrido.

## Demanda química de oxígeno

El mapa 4.14 muestra que más de 70% del territorio nacional presenta valores de DQO del agua superficial inferiores a 25 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , incluyendo las regiones de la Amazonía, la Orinoquia, el Macizo Colombiano, las cuencas de los ríos Atrato y San Juan y los departamentos de Cesar y Guajira.

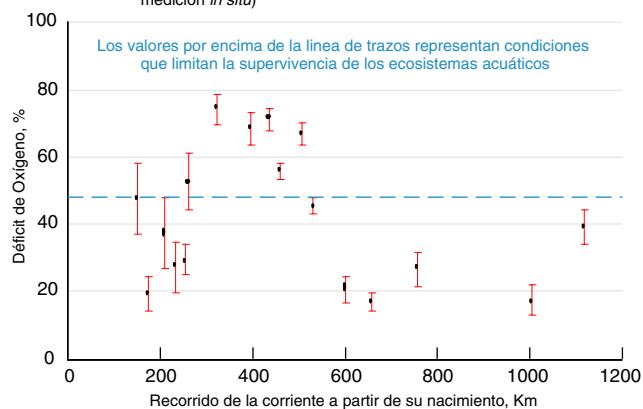
En general, las corrientes superficiales de las regiones de los departamentos de Valle del Cauca, Tolima y de las

**Matriz:** Agua superficial **Corriente:** Río magdalena **Periodo:** 1986 - 2000  
**Variable:** Déficit de Oxígeno (promedio e intervalo de confianza del 95%; medición *in situ*)



**Gráfico 4.52** Variación del déficit de oxígeno a lo largo del río Magdalena.  
(Fuente: IDEAM)

**Matriz:** Agua superficial **Corriente:** Río cauca **Periodo:** 1986 - 2000  
**Variable:** Déficit de Oxígeno (promedio e intervalo de confianza del 95%; medición *in situ*)



**Gráfico 4.53** Variación del déficit de oxígeno a lo largo del río Cauca.  
(Fuente: IDEAM)

regiones del Eje Cafetero, Magdalena Medio, Cauca Medio y el Caribe presentan valores de DQO entre 25 y 50 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , indicando una presión moderada por vertimiento de materia orgánica y sustancias oxidables.

Según los registros históricos, los valores más altos de DQO se encuentran en zonas de influencia por vertimientos de las ciudades de Bogotá y Pasto, así como el río Chicamocha. El río Bogotá y sus tributarios, a la altura de la ciudad de Bogotá, presentan los valores más altos de DQO (mayores de 100 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ ), cuya incidencia se manifiesta hasta la desembocadura en el río Magdalena, donde presenta valores entre 25 y 50 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ .

Cuando se contrastan los mapas de déficit de oxígeno y de DQO, es notoria la capacidad de autodepuración de las corrientes de agua superficial en términos de la degradación de la materia orgánica, como son los casos, por ejemplo, de los ríos Cauca en su cuenca media, y los ríos Bogotá

y Medellín, en los que los altos valores de DQO descienden paulatinamente en el transcurso de sus cauces, hasta llegar a sus respectivas desembocaduras en otros ríos. En el caso del río Bogotá, la degradación de la materia orgánica es favorecida por la oxigenación que recibe la corriente gracias a la caída en el salto del Tequendama, observable por la disminución de los valores de déficit de oxígeno y DQO aguas abajo de este punto hasta el río Magdalena.

De igual manera se destaca la presión particular que soporta cada corriente por sus características particulares, como caudal, velocidad y temperatura: una corriente de bajo caudal y baja velocidad tiene menor capacidad de asimilación de una descarga contaminante, que una corriente de alto caudal. Por ejemplo, el río Medellín en el Valle de Aburrá presenta déficit de oxígeno entre 60 y 80%, causado por una DQO entre 50 y 70 mg O<sub>2</sub>/L, mientras que, si bien el río Bogotá a la altura de la capital presenta un déficit de oxígeno similar, éste es causado por una DQO superior a 100 mg O<sub>2</sub>/L.

Las corrientes más intervenidas, de acuerdo con los registros disponibles en el IDEAM, son:

- Río Bogotá: actúa como colector de aguas residuales de la ciudad de Bogotá y poblaciones aledañas.
- Río Cauca: colector de aguas residuales de Cali, Palmira, Buga.
- Ríos Chulo y Chicamocha: reciben las aguas residuales de Tunja y del corredor industrial Paipa–Sogamoso.
- Río Pamplonita: sirve como colector de aguas residuales de Pamplona y Cúcuta.
- Río Pasto: recoge las aguas residuales de Pasto.

En la figura 4.6 se presenta la carga en t/día de demanda química de oxígeno a lo largo del río Magdalena en 1996; se observa un incremento gradual del transporte de carga orgánica, variando desde 375 t/día, en la estación Puente Balseadero, hasta 13.311 t/día, en la estación Calamar.

## Turbidez

En el mapa 4.15 se observa cómo los valores promedio más altos de turbidez, superiores a 500 NTU, se encuentran en seis zonas principalmente: tramo del río Cauca ubicado en el corredor industrial Cali–Yumbo, cuyo origen puede ser el vertimiento de aguas residuales; Bajo Magdalena, en la zona de los brazos Morales, Papayal, de Loba y Mompox (depresión Momposina), sistema en el cual se presenta un proceso de sedimentación de los sólidos suspendidos, principales causantes de la turbidez; río Magdalena en Barranquilla, después de que la turbidez desciende a partir de la unión de los brazos de Loba y Mompox, vuelve a aumentar debido probablemente a los procesos de dragado en la desembocadura; río San Jorge

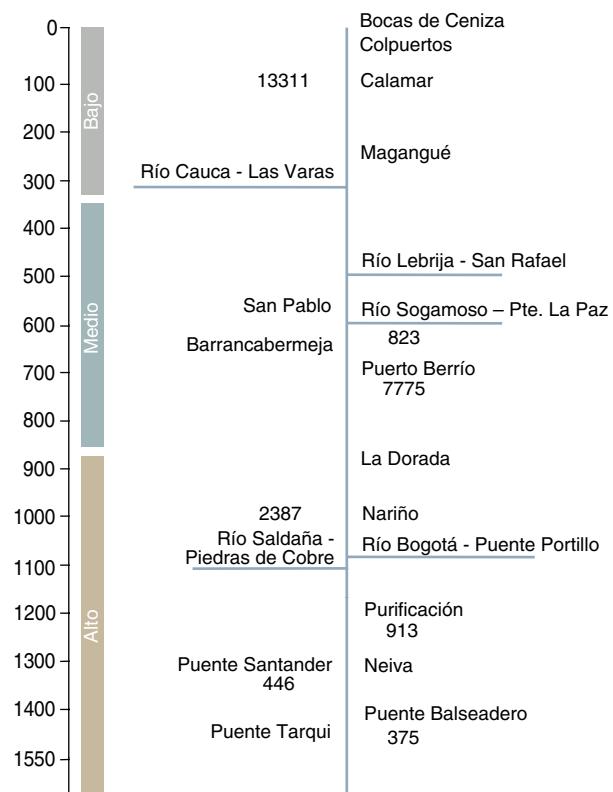


Figura 4.6 Río Magdalena y sus afluentes principales. Carga de demanda química de oxígeno (DQO) en t/día (1996). (Fuente: IDEAM 1996)

en el tramo de Ayapel, donde se presenta actividad minera que contribuye al aumento de los sólidos suspendidos; ríos Arauca y Cravo Sur, con valores mayores de 300 NTU.

En general las demás corrientes monitoreadas en el resto del país, incluyendo las regiones de la Amazonia y la Orinoquia, presentan valores de turbidez en su mayoría inferiores a 300 NTU. Las corrientes de la cordillera oriental en la zona montañosa presentan valores inferiores a 100 NTU. La turbidez se asocia con el contenido de sólidos en suspensión, además de ser influida, en cierta medida, por el color que presentan las aguas.

## Caracterización ambiental de las cuencas hidrográficas

El sistema orográfico y climático colombiano ha permitido el desarrollo y conformación de una gran variedad de cuencas hidrográficas en cuanto a tamaño, forma y rendimiento hídrico, con condiciones hidrológicas y climáticas especiales.

El desempeño de una cuenca en cuanto a disponibilidad de agua es un sistema complejo, dada la intervención de variables biofísicas, bioclimáticas, de cobertura

vegetal, estructura geológica y tipo de suelos; todas éstas inciden en la sostenibilidad del recurso hídrico.

Si a estas condiciones naturales, se añade la fuerte intervención humana a que han sido sometidas por medio de la ocupación, especialmente durante el último siglo, es fácil entender que las alteraciones del rendimiento hídrico superficial de una cuenca son importantes, considerables y evidentes. La tala indiscriminada, no sólo es la pérdida de importantes especies vegetales, sino que también incide sobre la regulación del recurso hídrico.

A partir del inventario de cuencas hidrográficas, el país se ha dividido en 12 zonas con características hidrológicas representativas. Para cada una de ellas se cuantifican las cuencas de acuerdo con un orden de magnitud. Se han considerado como microcuencas todas aquéllas con una superficie inferior a 10 km<sup>2</sup>, puesto que de ellas depende más del 80% del agua potable que consume el país y porque de la disponibilidad del recurso en ellas depende el desarrollo de la mayoría de los municipios.

Se estima que las microcuencas con extensión menor de 10 km<sup>2</sup> superan las 700.000 (*tabla 4.15*), de las cuales 72% se encuentra en la vertiente del Amazonas; el 13%, en el Pacífico y en el Atrato; solamente 15% corresponde a la zona Andina, y menos de 0,5% (3.750 microcuencas), a la Alta y Media Guajira.

En cuanto a las cuencas con superficie entre 10 y 100 km<sup>2</sup>, se estima que existen aproximadamente 27.000, y con extensión entre 100 y 1.000 km<sup>2</sup>, 1.300 cuencas.

Se debe destacar que solamente las cuencas de los ríos Cauca e Inírida tienen áreas entre 50.000 y 100.000 km<sup>2</sup>, y que las mayores de 100.000 km<sup>2</sup> corresponden a las cuencas de los ríos Magdalena, Caquetá, Meta y Putumayo. Colombia tiene además el privilegio de compartir con Venezuela y Perú dos de los ríos más extensos y caudalosos del mundo, como son el Orinoco y el Amazonas.

Para evaluar el grado de vulnerabilidad de las cuencas colombianas, en términos de la alteración del rendimiento hídrico superficial y de la capacidad natural para la recuperación sucesional vegetal, se han evaluado los elementos físicos, reconociendo la naturaleza y dinámica de los procesos físicos naturales: erosión, cobertura vegetal y estabilidad del relieve.

En la *tabla 4.16* se presenta el índice de vulnerabilidad para el cual los más bajos valores (<4.5) representan aquellas cuencas más vulnerables por sus condiciones biofísicas y por las presiones humanas ejercidas sobre ellas. El 40% de las grandes cuencas colombianas presenta una vulnerabilidad entre moderada y media.

Existe plena relación entre las zonas más pobladas del territorio nacional (zona Andina) y las cuencas más vulnerables. El hecho no es fortuito: la configuración del relieve andino colombiano, como se explicó anteriormente, proporciona una variedad de condiciones biofísicas cuyo equilibrio resulta muy delicado, reflejado en muchos puntos de fragilidad. Es notorio que esta situación no se presenta en cuencas secundarias o menores, sino en las cuencas estratégicas, como las de los ríos Magdalena, Cauca, Bogotá, Sogamoso, Sierra Nevada

Número	Zonas	<10 km <sup>2</sup>	10 a 100 km <sup>2</sup>	100 a 1.000 km <sup>2</sup>	1.000 a 5.000 km <sup>2</sup>	5.000 a 10.000 km <sup>2</sup>	10.000 a 50.000 km <sup>2</sup>	50.000 a 100.000 km <sup>2</sup>	>100.000 km <sup>2</sup>
1	Pacífico y Atrato	91,500	3,900	153	26		4		
2	Bajo Magdalena Río Sinú	8,570	300	59	4				
3	Sierra Nevada de Santa Marta	19,100	170	47					
4	Baja y alta Guajira	3,750	300	45					
5	Alto Magdalena	8,400	320	72	16	2			
6	Medio Magdalena	20,700	1,420	142	17	4	1		
7	Alto Cauca	7,321	370	51	4				
8	Medio Cauca	6,420	177	89	6	2			
9	Cabeceras ríos Meta y Arauca	11,605	216	25	4				
10	Catatumbo	11,420	284	27	5				
11	Sabanas, ríos Meta y Arauca	5,525	510	170	34				
12	Ríos Guaviare Vichada y Amazonas	520,000	18,900	430	33	16	10	2	3 (2)
	Totales	714,311	26,867	1,310	149	24	15	2 (1)	5 (3)

**Tabla 4.15.** Inventario de cuencas hidrográficas en Colombia. (Fuente: IDEAM)

(1) Ríos Cauca e Inírida (2) Ríos Guaviare, Caquetá y Putumayo  
(3) Ríos Guaviare, Caquetá, Magdalena y Putumayo.

Código	Cuenca	Valor	Vulnerabilidad natural
01	Alto Magdalena	4,4	
02	Sabana de Bogotá	4,0	
03	Medio Magdalena	4,0	
04	Río Sogamoso	3,6	
05	Bajo Magdalena	4,3	
06	Río Cesar	4,2	
07	Alto Cauca	4,2	
08	Medio Cauca	3,8	
09	Bajo Cauca	5,0	
10	Río Nechí	4,5	
11	S.N. S. Marta - occ.	4,4	
12	Río Tolo	6,4	
13	Río Atrato	6,2	
14	Sinú-Caribe	4,4	
15	S. N. S. Marta - norte	4,6	
16	Alta Guajira	2,0	
17	Baja Guajira	3,8	
18	Río Catatumbo	3,9	
19	San Andrés y Prov.	3,3	
20	Río Arauca	3,1	
21	Alto Meta	4,6	
22	Bajo Meta	3,1	
23	Río Vita	4,3	
24	Río Tomo-Tuparro	4,5	
25	Río Vichada	5,1	
26	Alto Guaviare	5,6	
27	Medio Guaviare	6,2	
28	Bajo Guaviare	6,8	
29	Río Inírida	6,7	
30	Río Atabapo	5,5	
31	Río Guanía	6,6	
32	Río Vaupés	6,8	
33	Río Apaporis	6,8	
34	Alto Caquetá	5,1	
35	Bajo Caquetá	6,6	
36	Río Puré	6,9	
37	Río Putumayo	6,6	
38	Río Mira-Guiza	5,6	
39	Alto Patía	3,2	
40	Bajo Patía	5,4	
41	Río Saquianga-Patía Norte	6,3	
42	Río Micay	6,1	
43	Río Coyanero-Dagua	5,7	
44	Río San Juan	6,3	
45	Río Baudó y directos	6,8	

**Tabla 4.16.** Vulnerabilidad del medio natural en 45 cuencas. (Fuente: IDEAM)



de Santa Marta, Sinú y Cesar. Otras se suman a la lista por sus características climáticas extremas, como en la Alta y Baja Guajira, con déficit históricos marcados.

Otras cuencas, por estar localizadas en zonas más húmedas, presentan menor grado de vulnerabilidad, como es el caso de las correspondientes a las regiones del Pacífico, Amazonia y parte de la Orinoquia.

Al examinar el mapa de Colombia, se observa que la mayor parte de las líneas fronterizas con los países vecinos se han demarcado teniendo en cuenta principalmente accidentes naturales como los ríos, ya sea porque éstos son compartidos o porque pasan de un país a otro. Por esta razón, los gobiernos siempre han estado atentos a suscribir planes de acciones bilaterales para el desarrollo integral de estas cuencas.

En el marco de convenios suscritos con los gobiernos de Perú, Ecuador, Venezuela y Brasil, se ha avanzado en el conocimiento de las cuencas de los ríos Putumayo, Amazonas, Carraipía-Paraguachón, Orinoco y Arauca. La participación de Colombia se ha realizado con diversas instituciones del Estado, entre ellas los ministerios de Relaciones Exteriores y Medio Ambiente, la Armada Nacional, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, la Dirección Nacional de Fronteras y la Dirección Nacional de Navegación en las cuencas internacionales. A continuación se presentan en forma breve los principales resultados obtenidos para cada cuenca.

### Cuenca del río Putumayo

El río Putumayo es fronterizo en casi toda su extensión; se forma en el Nudo de los Pastos y desemboca en el río Amazonas por su margen izquierda en territorio brasileño, a la altura de la población de San Antonio de Ica. En sus inicios es exclusivamente colombiano hasta la confluencia con el Cehembí; desde este punto, hasta la desembocadura del río San Miguel, es colombo-ecuatoriano. De allí hasta la desembocadura del río Yaguas es colombo-peruano; en el Trapecio Amazónico, exclusivamente colombiano y finalmente, hasta su desembocadura en el Amazonas, brasileño.

Como parte del plan bilateral para el desarrollo integral de la cuenca del río Putumayo acordado con el gobierno del Perú, se creó la comisión binacional<sup>9</sup>, en la cual se programaron cinco campañas conjuntas para el diseño e instalación de una red de estaciones hidrológicas y meteorológicas, la evaluación con mediciones hidrológicas y de calidad del agua y el levantamiento hidrotopográfico del cauce en toda la extensión de la frontera.

Actualmente, con la red hidrometeorológica binacional compuesta por 12 estaciones, se cuenta con información sobre caudales, velocidades del flujo, varia-

<sup>9</sup> Reunión de presidentes Colombia-Perú, San Antonio, 1989.

ción temporal y espacial de los niveles y calidad del agua. También existe una cartografía con el levantamiento hidrotopográfico del río en toda la frontera con el Perú.

Remontando el río, desde su desembocadura hasta la población peruana de Puca-Urco, es ancho y poco profundo, con extensas vueltas que forman meandros. En este tramo su ancho varía de 500 a 1500 m, sus márgenes son inundables y sólo existen algunos sectores elevados en los que se asientan contados poblados ribereños, como el de Tarapacá, en la frontera con Brasil. Aguas arriba de la población de Puca-Urco, hasta la población colombiana de Puerto Leguízamo, el río se hace cada vez más angosto, variando de 200 a 600 m.

La margen izquierda, que corresponde al lado colombiano, se caracteriza por ser más elevada que la margen derecha y por esta circunstancia se encuentra en este tramo la mayor densidad de población, apreciándose igualmente grandes extensiones cubiertas de pastizales destinados a la ganadería.

Las grandes crecientes en época de invierno provocan una fuerza erosiva considerable, que llega a causar grandes deslizamientos de las riberas, arrastrando consigo material suelto, arcillas e inclusive árboles de gran tamaño y formando palizadas con serio peligro para la navegación. También contribuye a la formación de bancos de arena dando origen a islotes.

En cuanto a navegabilidad, el río Putumayo tiene 1.800 km de recorrido navegable desde la boca hasta el poblado colombiano de Puerto Asís, y permite la navegación durante todo el año, en el tramo comprendido entre la desembocadura y la población del Estrecho (Perú), de embarcaciones de cuatro pies de calado. Desde allí hasta Güepí es recomendable la navegación sólo en épocas de crecientes, pues en tiempo de estiaje se presentan pasos de poca profundidad que dificultan el recorrido.

De acuerdo con las mediciones hidrométricas realizadas, las velocidades medias del flujo de la corriente varían de 0,5 a 1,5 m/s, dependiendo tanto de la época del año como del tramo de río considerado. Así, por ejemplo, la parte alta del río en época de caudales medios ( $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) alcanza valores cercanos a 1,5 m/s, mientras que en tiempo de estiaje ( $250 \text{ m}^3/\text{s}$ ) toma valores de 0,60 m/s. En la parte media y baja del río, en donde las profundidades oscilan entre 4 y 9 m, la velocidad varía alrededor de 0,90 m/s, para un caudal de  $7000 \text{ m}^3/\text{s}$  a la altura de la población de Tarapacá.

Comparando los registros obtenidos en diferentes campañas, se observa una gran variación de los niveles en la parte alta de la cuenca, con diferencias mayores de 2 m en sólo 48 horas. Sin embargo, los niveles se van haciendo más estables en las partes media y baja de la cuenca, tal como lo evidencia el hecho de que en Tarapacá la mayor fluctuación en 48 horas sea de 0,50 m.

## Cuenca del río Amazonas

En desarrollo del Tratado de Cooperación Amazónica, y dada la importancia que representa para Colombia y Perú conocer la dinámica del río Amazonas, en particular en el sector fronterizo Atacuarí-Leticia por los cambios que se han presentado en los últimos años, se incluyeron los estudios dirigidos a establecer la factibilidad de navegación en este sector del río.

En 1991 se inició, de común acuerdo con la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, el levantamiento hidrográfico del río Amazonas en el sector Leticia-Santa Sofía, la realización de mediciones hidrométricas y la obtención de análisis fisicoquímicos de los sedimentos en la estación hidrológica de Nazareth, ubicada en territorio colombiano.

Con el propósito de avanzar en el conocimiento e información sobre la dinámica, estado y distribución temporal y espacial de esta cuenca, se tiene información hidrometeorológica, hidráulica y geomorfológica del río Amazonas y se cuenta con la red de medición y observación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas de Nazareth (Colombia) e Iquitos (Perú). Como resultado existen mapas del levantamiento hidrotopográfico del río Amazonas a escala 1:10.000 y 1:50.000, del sector fronterizo Atacuarí-Leticia y la información hidrometeorológica del área de influencia fronteriza.

De la información hidrológica obtenida se observa que el río Amazonas presenta una característica monomodal: inicia la época de creciente en noviembre, alcanzando los mayores niveles en mayo, para iniciar su descenso en julio y presentar el nivel mínimo de estiaje en septiembre. Los niveles en la estación de Leticia muestran una variación de más de 12 m, de 5,50 a 17,90 m. El ancho medio del río, en el tramo de 116 km que Colombia comparte con el Perú, es de 2,5 km y el caudal medio, de  $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El río Amazonas ofrece todas las ventajas para la navegación de buques de gran calado en época de invierno, no obstante, no deja de presentar peligro por las palizadas que arrastra la corriente. En épocas de estiaje, el peligro lo constituyen los grandes bancos de arena que quedan al descubierto formando nuevas islas.

### Cuenca Carraipía-Paraguachón

Con el gobierno de Venezuela se concertó el estudio integral de la cuenca hidrográfica del Carraipía-Paraguachón<sup>10</sup>, que en territorio colombiano cubre parte del departamento de La Guajira. Está orientado al

<sup>10</sup> Declaración de Ureña, suscrita por los presidentes de Colombia y Venezuela el 28 de marzo de 1989.

conocimiento del recurso hídrico, lo que permite establecer su aprovechamiento integral y su conservación para el desarrollo de las diversas actividades socioeconómicas que se efectúan en la frontera colombo-venezolana.

Esta zona fronteriza representa un área de gran importancia para los dos países por razones étnicas, sociales, ambientales, culturales, económicas e históricas. Para el diagnóstico se incluye la evaluación de las condiciones de escorrentía superficial y de agua subterránea. Por las reconocidas características de la zona, consistentes en una marcada sequía a lo largo del año, se evalúan diferentes aspectos del entorno natural para establecer la factibilidad de la construcción de un sistema de regulación en la quebrada La Chingolita. Es importante resaltar la reforestación de la cuenca alta, como medida de regulación y preservación.

### Cuenca del río Orinoco

Los estudios de esta cuenca también se adelantan con el gobierno de Venezuela y se orientan en particular al aprovechamiento hidroeléctrico del río Orinoco. Inicialmente, se consideró el tramo comprendido entre Puerto Inírida (Colombia) y Puerto Nuevo (Venezuela) para hacer la caracterización hidroclimática y de la calidad del agua.

A partir de la información proveniente de los dos países, así como con los datos obtenidos en las campañas de mediciones hidrológicas, se tiene la caracterización climática e hidrológica, así como las condiciones de calidad del agua, en el tramo ubicado aguas abajo de la confluencia de los ríos Orinoco y Meta.

La caracterización climatológica, obtenida de los estudios sobre la Orinoquia colombiana y el estado del Amazonas (Venezuela), incluye un análisis espacial de la precipitación, temperatura, evapotranspiración, radiación e insolación y los vientos; también se evalúan las curvas de intensidad-duración-frecuencia para las lluvias. La precipitación media varía alrededor de 2.300 mm anuales y la temperatura media es de 28° C, alcanzando en épocas de verano hasta 39° C.

A partir del inventario de las estaciones hidrométricas, tanto colombianas como venezolanas, se seleccionaron seis para conformar la red binacional y otras 11 que constituyen la red complementaria, instaladas en los principales afluentes del río Orinoco. En esas estaciones se realizan mediciones de caudales líquidos, sólidos y muestras para análisis fisicoquímicos. Con base en esta información se tiene la caracterización hidrológica del área de influencia de la línea fronteriza del río Orinoco; en particular, los caudales del río Orinoco a la altura de la desembocadura del río Guaviare, del orden de 11.500 m<sup>3</sup>/s, y en la con-

fluencia con el río Meta, de 21.500 m<sup>3</sup>/s para valores medios y de 45.500 m<sup>3</sup>/s, cuando alcanza los máximos.

Como indicativos de la calidad del agua, se tiene información sobre parámetros como pH, turbiedad, oxígeno disuelto, alcalinidad total, dureza total, cloruros, fósforo soluble total y silicio reactivo, sin contar aún con muestreos suficientes para caracterizar la zona.

### Cuenca del río Arauca

También con el gobierno de Venezuela se adelanta el estudio para conocer el estado actual del río Arauca<sup>11</sup>, con miras al desarrollo de acciones conjuntas para recuperar su navegabilidad y el cauce establecido como límite internacional<sup>12</sup>.

Como aporte de Colombia se realizó el estudio geomorfológico y de dinámica fluvial del río en los sitios críticos y de interés para los dos países, y el diseño preliminar de las obras necesarias para recuperar la navegabilidad del río.

## Evaluación de la fuente que abastece los acueductos

Teniendo en cuenta la alta vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento de agua y considerando que el abastecimiento de agua para la población es uno de los sectores usuarios más importantes, se definió como prioritario evaluar el comportamiento de la oferta hídrica en ellos.

La identificación de fuentes de abastecimiento se presenta clasificándolas según el orden de magnitud de su oferta hídrica. Se consideran dos grandes grupos: una de agua superficial y otra de agua subterránea. Entre las superficiales se distinguen los cuerpos lénitos y lóticos, éstos últimos divididos en dos categorías: ríos grandes o pequeños, y quebradas o arroyos.

En el marco de los estudios que ha elaborado el Ideam sobre el Fenómeno Cálido del Pacífico, se ha considerado la categorización mencionada, estimando el riesgo natural al que está sometido el abastecimiento de agua bajo la condición de alteración de oferta hídrica en la cabecera del municipio<sup>13</sup>. A partir del riesgo natural obtenido se ha valorado la necesidad de atención que requiere un municipio dado.

13 Acordado en reunión de ministros del Medio Ambiente de Colombia y Venezuela.

14 Tratado de 1941.

15 Se considera que la captación del acueducto municipal se encuentra en una zona muy próxima a la cabecera municipal.

Es importante observar que un alto porcentaje de los acueductos del país se surte de ríos pequeños, quebradas y arroyos, lo cual determina una alta vulnerabilidad de esos aprovechamientos, especialmente en aquellas zonas con serios problemas por la típica distribución espacial y temporal del recurso hídrico, tales como la región Caribe, en particular, en los departamentos de La Guajira, Cesar, Magdalena y Bolívar, y en la región Andina, en los departamentos de Huila, Tolima, Valle del Cauca,

Cundinamarca, Boyacá, Santanderes y parte de los departamentos de Cauca y Nariño.

En los departamentos de Santander, Cundinamarca, Boyacá y Tolima, en los cuales más del 60% de los acueductos de las cabeceras municipales se abastecen de pequeños ríos, quebradas y arroyos, los posibles efectos de una reducción en la oferta hídrica se manifestarían de forma casi inmediata en los sistemas de suministro de agua a la población (*mapa 4.16*).





## Glosario

Amplitud de oscilación del hidrograma: Diferencia absoluta entre el máximo y el mínimo caudal o nivel del hidrograma.

Carga de sedimentos: Es la cantidad de sedimentos tanto de suspensión como de fondo que puede transportar una corriente natural o artificial en la unidad de tiempo.

Caudal: Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo.

Caudal base: Parte del caudal que se incorpora a una corriente de agua, procedente principalmente de aguas subterráneas.

Calor específico: Es la cantidad de energía térmica que contienen las moléculas.

Concentración de sedimentos: Es el peso del sedimento por unidad de volumen de la mezcla agua-sedimento, en miligramos/ litro o en partes por millón (ppm).

Ciénaga: Superficie inundable, receptora global de las masas de agua provenientes de las lluvias a lo largo de las cuencas y que pueden estar conectadas a un río por medio de canales de características meándricas.

Cinética molecular: Hace referencia a la energía que contiene la estructura cristalina por efecto de la interacción molecular.

Escorrentía: Parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo en un curso de agua.

Embalse: Depósito natural y artificial para el almacenamiento de agua.

Estratigrafía: Rama de la geología que estudia el tipo de rocas, las relaciones, el ambiente de formación y la dinámica de los cuerpos rocosos.

Hidrograma: Representación gráfica de la variación del nivel o caudal en el tiempo.

Isoyeta: Línea que une los puntos de igual altura de precipitación, en un período dado.

Lago: Masa aislada y permanente de agua, de considerable volumen con comunicación al mar o sin ella.

Laguna: Depósito natural de aguas superficiales de menor dimensión que un lago.

Litología: Parte de la geología que se encarga de la descripción de las rocas.

Meandriformes: Patrón de drenaje en el cual las corrientes presentan una serie de curvas o vueltas en el curso de su etapa madura o en su recorrido a través de una llanura.

Meandro: Porción curva de un cauce de corriente siniuosa consistente en dos giros consecutivos, uno en la dirección de las agujas de reloj y otro al contrario.

Pantano: Zona caracterizada por una saturación de humedad permanente, estanqueidad y escasa fluidez en los horizontes superiores del suelo y del subsuelo.

Pequeño lago: Pequeño depósito o masa de agua aislada de menor volumen que una laguna.

---

## Referencias bibliográficas



Apha; AWWA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19<sup>th</sup> ed. American Public Health Asociation: Washington, 1995

Chebotariev, A Y, *Diccionario hidrológico*. Guidrometeoizdat: San Petersburgo, 1964 (en ruso)

Christopherson, R W, Geosystems. An introduction to physical geography. 3<sup>d</sup> ed., Prentice-Hall: New Jersey, 1997

Csuros, M. *Environmental sampling and analysis for technicians*. Lewis Publishers: Florida, 1994

Custodio, E y Llamas, MR. *Hidrología subterránea*, 1<sup>a</sup> ed., Ediciones Omega S.A.: Barcelona, 1976

Dingman, SL, *Physical hydrology*. Prentice-Hall Inc.: New Jersey, 1994

Duvigneaud, P. *La síntesis ecológica*, Editorial Alhambra:, Madrid, 1981

Educar Cultural Recreativa S A. *Gran enciclopedia ilustrada, Colección de la obra original*, Rizzoli: Milano, 1995

- Freeze, Ch. *Groundwater*. Prentice Hall, 1979
- Himat, "Observación en relación con los procesos de precipitación y escorrentía en la cuenca superior de los ríos Cauca, Patía, Caquetá y Magdalena" por Leonardo Rivera Pérez, en *Revista de la Asociación Colombiana de Ingenieros Geógrafos*, N° 3, octubre 1992
- Horne, A, *Marine chemistry*. John Wiley: New York, 1982
- Holmes, G; Singh, B R y Theodore, L. *Handbook of environmental management and technology*. John Wiley & Sons: USA, 1993
- Huggett, A. et al. Mapa hidrogeológico de Colombia. Escala 1: 2.500.000. Ingeominas. Bogotá, 1989
- Ideam, Estudio nacional de agua. Balance hídrico y relaciones oferta-demanda de agua en Colombia. Indicadores de sostenibilidad proyectados al año 2016. Santa Fe de Bogotá, 1998
- Ingeominas. Consideraciones sobre las aguas subterráneas en Colombia y sus posibilidades de explotación. Santa Fe de Bogotá, 1997
- Losiev, K.S. *El agua*, Guidrometeoizdat: San Petersburgo, 1989 (en ruso)
- Marin, R. Ministerio de Agricultura. Estadísticas sobre el recurso agua en Colombia. HIMAT, Santa Fe de Bogotá, 1992
- Moran, JM y Morgan, MD. *Meteorology The atmosphere and the science of weather*, 4<sup>th</sup> ed., Mac Millan: New York, 1994
- Orlov, B G. "Recursos hídricos de la región noroccidental de Rusia". En: *Preguntas de ecología y cálculos hidrológicos*, Instituto Estatal Hidrometeorológico de Rusia: San Petersburgo, 1994 (en ruso)
- Organización Mundial de Meteorología. *Evaluación general del recurso agua dulce en el mundo*. SEI: Ginebra, 1997
- Organización Mundial de Meteorología-Unesco, *Glosario hidrológico internacional*, Ginebra, 1992
- Salazar, A. "Ciclicidad de los caudales medios en las cuencas del Cauca y del Magdalena". *Revista Atmósfera*, N° 5, 1992
- Salazar, A. Contaminación de recursos hídricos: Modelos y Control. Ainsa, 2 ed., Medellín, 1996
- Sawyer, CN, McCarty, PL y Gene, F. *Chemistry for environmental engineering*. McGraw Hill International Editions. 4<sup>th</sup> ed. Singapore, 1994
- Shaw, EM y Reinhold, VN, *Hydrology in practice*. Van Nostrand Risnhold Co Ltd.: UK, 1985
- Seoanez, C M, et al. *Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental*. Ediciones Mundo y Prensa: España, 1996
- Vélez, M. *Hidráulica de aguas subterráneas*. Universidad Nacional de Colombia. Santa Fe de Bogotá, 1992
- Villota, H. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras, IGAC: Bogotá, 1991
- Vladimirov, AM , *Cálculos hidrológicos*, Guidrometeoizdat: San Petersburgo, 1990 (en ruso)
- Vladimirov, AM y Druzhinin, VS. *Cálculos hidrológicos. Problemas y ejercicios*, Guidrometeoizdat: San Petersburgo, 1992 (en ruso)