

# CUATRO ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS CONTINENTALES. FORMULACIONES Y APLICACIÓN

A. RAMÍREZ ‡, R. RESTREPO\*, y G. VIÑA ◊

‡ Ecotest Ltda., Carrera 15 # 29-37 Of. 401, Santafé de Bogotá, Colombia.

◊ BP Exploración, Po Box 59824, Santafé de Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

\* Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia.  
e-mail: rrestrep@infantas.ecp.com.

---

**E**n este documento se formulan cuatro *índices de contaminación*, los cuales califican diferentes cualidades de las aguas y, por lo tanto, complementan el panorama ambiental de un curso hídrico, tal como lo demuestra la correlación próxima a cero entre ellos. Los mismos han sido propuestos a partir de la experiencia acumulada en programas de monitoreo hidrobiológicos, implementados por la industria petrolera en Colombia por más de seis años y en los resultados arrojados por estadísticas multivariadas. Los índices se desarrollaron con base en legislaciones de diversos países, acordes con las concentraciones de las distintas variables y los usos potenciales de las aguas. Dichos índices de contaminación (ICO) son: ICOMI o de mineralización, ICOMO o de contaminación orgánica, ICOSUS relativo a los sólidos suspendidos, e ICOTRO o trofia del sistema. Los índices son de fácil estimación (matemática o gráficamente) y permiten puntualizar el tipo de problema ambiental existente, tal como se observa en la aplicación desarrollada. En virtud al reducido número de variables involucradas (8), la aplicación de estos índices representa claras ventajas económicas, por lo que sería muy importante vincularlos a la legislación ambiental nacional.

In this paper four *indices of contamination*, which qualify different water aspects are presented. Such indices allow for an overall assessment of the environmental status of the water bodies. These indices have been derived from accumulative experiences in hydrobiological monitoring in the Colombian Petroleum Industry for six years. Multivariable statistics was used. The indices were developed based on legislation from several countries, in accordance with the concentration of the different parameters and water usages. This indices of contamination (ICO) are: ICOMI (mineralization), ICOMO (organics contamination), ICOSUS (suspended solids) and ICOTRO (trophia system). The indices are easy to estimate (mathematically and/or graphically) and allow the identification the type of environmental problem, existing as demonstrated with examples and the near to zero correlations found. Thanks to the minimum number of variables, the application of these indices also diminishes monitoring and evaluation costs. In view of the advantages above mentioned it is worth considering integrating the indices in to the national legislation.

---

**Palabras claves:** Contaminación, índices de calidad de las aguas, diagnóstico ambiental, impacto ambiental

\* A quien debe ser enviada la correspondencia

## INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas se han propuesto y empleado los Índices de Calidad de las Aguas (ICA), los cuales tienen como propósito simplificar en una expresión numérica las características positivas o negativas de cualquier fuente de agua (Martínez de Bascaran, 1976, Prat *et al.* 1986, MOPT 1992).

Los ICA tienen como objeto la estimación de un número generalmente entre 0 y 1, ó 0 y 100, que define el grado de calidad de un determinado cuerpo lúctico continental. Con ello se pretenden reconocer, de una forma ágil y fácil, problemas de contaminación, sin tener que recurrir a la observación de cada una de las numerosas variables fisicoquímicas determinadas. Las bondades resultan mayores cuando se evalúa una cantidad amplia de cursos hídricos, o incluso, si solamente se estudia uno, pero en forma periódica.

Algunas de las variables incluidas en estos índices merecen no obstante ser cuestionadas como es el caso de la temperatura, por cuanto su valor se modifica de forma natural con la altitud y las épocas climáticas. De igual modo, las impurezas aparentes constituyen una variable cualitativa subjetiva al observador, que incluye entre otros, olor o apariencia. Al respecto, Behar *et al.* (1997) plantean inquietudes por la presencia de la temperatura y los nitratos en el ICA.

Prat *et al.* (1986) encontraron las siguientes incongruencias en un estudio realizado en aguas españolas: cursos con alta conductividad pero a la vez con alta concentración de oxígeno, conducían a valores excesivamente bajos del ICA por ellos utilizado (ISQA); bajas correlaciones entre la demanda química del oxígeno (DQO) y el ICA sugieren que se puede prescindir de la DQO; no existe correlación entre el ICA y el índice biológico de taxones presentes; la ponderación de algunos parámetros es excesiva.

Un interrogante mayor a los ya planteados, lo representa el hecho de conjugar en un único registro una inmensa cantidad de variables que denotan problemas de contaminación ampliamente disímiles. A manera de ejemplo, tres cursos hídricos diferentes podrían obtener una calificación de 0,6, la cual señala una condición regular en sus aguas; en el primero de ellos bien podría ocurrir alta temperatura, sólidos inorgánicos y turbiedad, en el segundo elevada demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y coliformes totales, y en el tercero

valores medios de todas las variables que conforman el índice. Es claro entonces, que las situaciones ambientales definidas en cada curso son completamente distintas, situación que no discriminan generalmente los índices de calidad de las aguas.

Si bien el desarrollo de los ICA ha jugado un papel muy importante en el contexto ecológico y medio ambiental, sus debilidades constituyen un obstáculo importante para su aplicación, ya que al concentrarse en un único número la cualidad de un cuerpo de agua, se produce una inmensa pérdida de información (en concordancia con Behar *et al.* 1997), y con ello, se enmascara la condición real y los cambios que se suceden sobre un curso hídrico.

Es importante recalcar lo anterior, puesto que se pretende relacionar estos índices con indicadores biológicos de contaminación (Prat *et al.*, 1986, Zúñiga *et al.*, 1994). No obstante, un ICA bajo (por ejemplo, menor a 0,5), tan sólo permite asociar la presencia-abundancia de una determinada especie o taxon, a una condición "regular general", mas no a un problema de contaminación particular, como por ejemplo contaminación orgánica. Para lograr esto último, tendría que retornarse a la matriz de variables fisicoquímicas y observar el comportamiento de numerosas variables, hecho que debilita la utilidad de los ICA.

En razón de las limitaciones manifiestas en los ICA, se presentan en este documento las formulaciones y fundamentaciones para el empleo de cuatro índices de contaminación (ICO), los cuales son complementarios en sentido ecológico y, por lo tanto, permiten precisar problemas ambientales, así como profundizar en la identificación de especies con potencial indicador.

## METODOLOGÍA

Como punto de partida para la formulación y consolidación de los índices de contaminación, se tomaron como base los siguientes estudios limnológicos, llevados a cabo por grupos de la industria petrolera en el país y de los cuales los autores formaron parte:

- Línea Base del Oleoducto de Colombia (Oleoducto de Colombia - Ecopetrol, ICP 1993): comprende 31 variables en tres épocas de monitoreo, sobre un total de 16 cuerpos lúcticos y 33 estaciones en lúcticos. Se localiza entre la Estación de Vasconia, en

- Puerto Boyacá y el terminal petrolero de Coveñas.
- Monitoreo del campo Cusiana - Cupiagua (BP. Exploration - Ecotest 1996a): incluye 35 variables muestreadas en 31-37 estaciones de sistemas lóticos, en seis oportunidades. Comprende las cuencas de los ríos Unete, Cusiana y Túa, en la vertiente del Río Meta.
  - Monitoreo del Bloque Piedemonte (BP. Exploration - Ecotest 1996b): de 24 a 27 cursos lóticos, 34 variables fisicoquímicas, en 4 épocas de muestreo. Sobre el Piedemonte casanareño en las cuencas de los ríos Pauto, Cravo Sur y Charte.
  - Monitoreo del corredor del oleoducto El Porvenir - Vasconia (Ocensa - Ecotest 1996), con 28 variables fisicoquímicas, sobre 25 estaciones en cuerpos de agua lóticos y en tres épocas de muestreo.
  - Monitoreo del corredor del Oleoducto Cusiana - Coveñas (Ocensa - Ecotest en preparación): tiene lugar en 74 cursos lóticos, sobre 26 variables fisicoquímicas. Se ha tomado la información relativa al primero de tres muestreos (julio 1996).

En todos los estudios referidos, se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica de las aguas mediante Análisis de Componentes Principales (ACP). Esta estadística tiene como propósito reducir un espacio multivariado (ej: numerosas variables fisicoquímicas) a unos pocos ejes o componentes explicando un alto porcentaje de la varianza total (Overall and Klett, 1972; Kendall, 1975; Johnson and Wichern, 1982).

Esta técnica ha sido ampliamente reconocida a nivel mundial en la caracterización fisicoquímica de arroyos (Boulton and Lake, 1990), ríos (Simoneau, 1986), áreas inundables (Johnston *et al.*, 1990), lagos (El-Shaarawi *et al.*, 1986; Schetagne, 1986; Matthews *et al.*, 1991) y ciénagas contaminadas por petróleo (Viña *et al.*, 1991). Así mismo, ha sido la base de análisis para numerosos programas de monitoreo limnológico llevados a cabo en España (Margalef, 1983).

El ACP tiene la virtud de agrupar las estaciones con condiciones ambientales similares y de desagregar aquellas que manifiestan las características más disímiles, a partir de las correlaciones existentes entre unas y otras variables. Este hecho señala que su aplicación es más consistente en estudios con numerosas estaciones, pues se incrementa la solidez del análisis.

La relación del ACP con la formulación de los índices de contaminación no estriba en sus resultados, sino en el cálculo de matrices de correlación entre todas las variables, hecho que permite identificar las asociaciones entre ellas (Margalef, 1983; Ramírez, 1988; George *et al.*, 1991). De los estudios y análisis referidos, se tomó entonces la información pertinente a dichas matrices en las cuales se identifican además, las correlaciones significativas a un nivel de confiabilidad del 95%.

A partir de ellas, se definieron grupos de variables fisicoquímicas que denotan una misma condición ambiental y se seleccionaron algunas de las variables más representativas o de fácil determinación, para ser involucradas en los índices de contaminación (ICO).

El procedimiento seguido en la formulación de los ICO fue similar al empleado en el desarrollo de los ICA:

- Selección de variables físicas y químicas.
- Asignación de valores de calidad (0 a 1) a diferentes concentraciones de las variables, o establecimiento de una relación (ecuación) entre índice - variable, con base en legislaciones o parámetros definidos por diversos autores para diferentes usos del agua.

Las variables fisicoquímicas que se involucraron en el cálculo de los ICO, al igual que los ICA, recayeron en condiciones generales de la calidad del agua y no en contaminantes específicos. En la Tabla 1 se presentan algunos de los ICA más utilizados.

Sobre las coordenadas resultantes para cada variable, se llevó a cabo análisis de regresión por mínimos cuadrados mediante modelos lineal, exponencial, logarítmico, parabólico, de potencia y recíproco, seleccionándose en cada caso aquella relación estadísticamente válida (95% de confiabilidad), que además de exhibir alto coeficiente de determinación ( $r^2$ ), se ajustase a una relación esperada. Para dicho modelo se estableció la ecuación de regresión, es decir, entre índice y concentración de la variable.

Después, aquellas variables que denotaron un mismo criterio de contaminación, fueron agrupadas en un único índice de contaminación. Si bien es posible construir cada índice con numerosas variables, los mismos por simplicidad y economía, deben recoger tan sólo unas pocas, sin ser conducentes a pérdida de información.

Tabla 1. Variables fisicoquímicas consideradas en el cálculo de los ICA.

VARIABLES	Indice de calidad del agua		
	National Sanitation Foundation (INSF, 1970)	Martínez de Barcaran (1976)	ISQA (en Prat et al 1986)
Oxígeno disuelto	X	X	X
Coliformes totales		X	
Coliformes fecales	X		
pH	X	X	X
DBO5	X		
Consumo de permanganato de potasio (DQO)		X	X
Temperatura	X	X	X
Amoníaco		X	X
Nitritos			X
Nitratos	X		X
Fosfatos	X		
Ortofosfatos			X
Turbiedad	X		
Sólidos totales	X		
Alcalinidad			X
Conductividad		X	X
Salinidad		X	
Residuo seco			X
Impurezas aparentes		X	

## RESULTADOS

### Correlaciones entre variables fisicoquímicas

Se eligieron algunas variables que se consideraron relevantes por su rol ecológico, o porque en sí mismas conjugan, de forma simultánea, el papel de distintas variables; sobre ellas se observaron las correlaciones que exhibieron en los diferentes estudios previamente referidos. Dichas variables fueron: conductividad, pH, sólidos suspendidos, oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, fósforo total y coliformes totales.

En la Tabla 2 se exponen las correlaciones significativas positivas que tuvieron lugar en cerca de un 50% o más de las oportunidades (8 o más de un total de 17) y en la Tabla 3, aquellas que aparecieron en porcentajes menores. Cabe notar que los coliformes

totales y la demanda bioquímica de oxígeno no fueron determinadas en el programa de monitoreo del Oleoducto de Colombia.

La **conductividad** refleja la mineralización de las aguas (sólidos disueltos) y conjuga los cationes sodio, potasio, calcio, magnesio, así como los aniones carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros, principalmente. Se observan correlaciones significativas entre estas variables y sólidos disueltos, dureza y alcalinidad.

El **pH** expresó sus principales correlaciones con componentes de mineralización como alcalinidad y, en menor forma, con conductividad y sólidos disueltos, con un valor de 6 (Tabla 3). La relación del pH con la alcalinidad está sustentada en el hecho de que esta última mide la capacidad del agua para aceptar iones de hidrógeno, lo cual se hace determinando en esencia

Tabla 2. Variables que muestran correlaciones positivas significativas en un 50% de las oportunidades

VARIABLE BASE	Número de veces	Variables Correlacionadas
Conductividad	15	Sólidos disueltos, sulfatos, alcalinidad
	13	Dureza
	8	Cloruros
Sólidos suspendidos	14	Turbiedad
	8	Amonio
Demanda bioquímica de oxígeno	13	Demanda química de oxígeno
Fósforo total	10	Ortofosfatos
Coliformes totales	11	Coliformes fecales
pH	8	Alcalinidad

las concentraciones de bicarbonato, carbonato e hidroxilo; el carbono por demás, pasa de CO<sub>2</sub> a bicarbonatos cuando el pH es de 6 a 10, y a carbonatos en pH mayor a 10 (Manahan, 1991; Margalef, 1983).

Los **sólidos suspendidos** reflejan una condición distinta a los sólidos disueltos y no denotan correlaciones sistemáticas con las variables propias de mineralización. Puede medirse por su concentración, o a través de la turbiedad, aunque esta última es tan sólo una expresión de la primera. Su principal causa la constituyen los procesos erosivos y extractivos, y su efecto sobre los ecosistemas acuáticos se manifiesta en la reducción de la penetración de luz y con ello impedimento de fotosíntesis. Es destacable el hecho de que el amonio (variable propia de contaminación orgánica) se encuentre asociado en un número importante de oportunidades, 8 a esta variable (Tabla 2), así como ocurre con la demanda de oxígeno (DBO y DQO).

El **oxígeno** no mostró correlaciones de forma repetida con otras variables, hecho que indica que su valor está asociado a condiciones como caudal, velocidad, geografía, capacidad de reaireación o altitud, por lo que muestra independencia con el conjunto de variables referidas. Constituye la variable con más correlaciones negativas, aunque no en forma permanente con alguna de ellas. Se destacan: cuatro con el fósforo y tres con alcalinidad, sulfatos, sólidos disueltos y pH. Su papel biológico es fundamental, pues define la presencia o ausencia potencial de todas las especies acuáticas y el tipo aeróbico o anaeróbico prevaleciente

en el ecosistema.

La **demanda bioquímica de oxígeno** mostró correlación con la demanda química, debido a que forma parte de esta última. La DBO<sub>5</sub> está definida por la cantidad y tipo de materia orgánica en proceso de descomposición; cabe destacar, sin embargo, que no muestra correlación positiva o negativa con la concentración de oxígeno.

El **fósforo** total se correlaciona tan sólo con los ortofosfatos; estos últimos forman parte del primero. Por ser usualmente el nutriente limitante, define el tipo de organismos vegetales que habrán de prevalecer, así como la eutrofización de los ecosistemas acuáticos. Si bien este último fenómeno es más importante en sistemas lénticos, se expresa también bajo muchas circunstancias en los lóticos. Así, en aguas claras de alta media montaña, se reconocen abundantes comunidades de perifiton, mientras que en caños y quebradas de la cuenca baja (ej: llanura costeña), se observa copioso desarrollo de fitoplancton y macrófitas, en razón a que durante las temporadas de sequía estas aguas se estancan o poseen una velocidad muy reducida, permitiendo el desarrollo de las comunidades referidas.

Si bien en cursos caudalosos como por ejemplo los ríos Magdalena, San Jorge y Sinú, la concentración de fósforo por sí misma no es relevante dado que no hay proliferación de microalgas o de macrófitas, la eutrofización sigue siendo una variable de alta connotación ecológica, por que dichas aguas alimentan los más importantes sistemas cenagosos del país, donde sí ocurre crecimiento vegetal y se reconoce, además, alta

Tabla 3. Variables que muestran correlaciones positivas significativas en menos del 50% de las oportunidades.

VARIABLE BASE	Número de veces	Variables Correlacionadas
Conductividad	5	pH
	3	Calcio, magnesio, potasio, DQO, coliformes fecales, nitratos
	2	Acidez, sólidos suspendidos, oxígeno, ácido sulfídrico, ortofosfatos ortofosfatos, color, nitritos, temperatura, turbiedad, grasas, amonio
pH	6	Conductividad, sólidos disueltos
	5	Dureza
	2	Sulfatos, temperatura, DQO, cloruros, oxígeno
	1	Fósforo, fosfatos, nitratos, nitritos, amonio, turbiedad, sólidos suspendidos, calcio, magnesio, potasio, grasas
Oxígeno	3	pH
	2	Turbiedad, fosfatos, fósforo
	1	Amonio, dureza, temperatura, nitrógeno, nitratos, nitritos, DQO conductividad, color
Sólidos suspendidos	7	DQO
	6	Color, sólidos disueltos
	5	Sulfatos, fósforo, DBO
	3	Nitratos, coliformes totales
	2	Fosfatos, conductividad, fenoles, coliformes fecales, nitritos, dureza
	1	Alcalinidad, temperatura, acidez, cloruros, pH, nitrógeno
Demanda bioquímica de oxígeno	7	Turbiedad
	5	Coliformes totales
	4	Fenoles, color, amonio
	3	Fosfatos, dureza, nitratos, coliformes fecales, grasas
	2	Sólidos disueltos
	1	Fósforo, sulfatos, temperatura
Fósforo total	5	Sulfatos, sólidos suspendidos
	3	Dureza, oxígeno, nitritos, sólidos disueltos
	2	Cloruros, grasas, coliformes fecales, turbiedad, pH, conductividad
	1	Calcio, potasio, alcalinidad, fenoles, color, DBO, DQO, coliformes totales
Coliformes totales	3	Dureza, sólidos suspendidos
	2	Fósforo total, DBO
	1	Sulfatos, amonio, fenoles, sólidos disueltos, DQO, cloruros, fosfatos

producción pesquera.

La eutrofización puede determinarse mediante las variables que la causan: concentraciones de nutrientes, principalmente fósforo u ortofosfatos, o a través de los efectos que éstos producen como son las densidades fitoplanctónicas (o de macrófitas), la concentración de clorofila *a*, o incluso mediante variables conexas como la medición de la transparencia (con disco de Secchi) o la concentración de oxígeno (Henaó, 1987).

Es importante hacer notar, además, que el nitrógeno (segundo nutriente en importancia) en sus formas de nitrato y nitrito, no presenta correlaciones importantes con otras variables.

Los **coliformes totales** se correlacionan con los fecales, dado que estos últimos forman parte de los primeros. Exhiben independencia con las variables restantes.

En este punto es importante señalar que, mientras la mineralización de las aguas se expresa en un único grupo, los procesos de oxidación-reducción-contaminación orgánica, ocurren y se manifiestan en variables no conexas. El conjunto de características referidas se esquematiza en la Figura 1.

Los resultados hasta aquí expuestos corresponden,

en buena medida, con los encontrados por Margalef (1983), quien plantea, con base en numerosos estudios de componentes principales realizados en aguas continentales de España, dos grandes grupos de variables: mineralización y oxidorreducción.

### Índices de contaminación

Con base en las correlaciones referidas, se definieron los siguientes índices de contaminación:

- **Índice de contaminación por mineralización (ICOMI):** se expresa en numerosas variables, de las cuales se eligieron: conductividad como reflejo del conjunto de sólidos disueltos, dureza por cuanto recoge los cationes calcio y magnesio, y alcalinidad porque hace lo propio con los aniones carbonatos y bicarbonatos.
- **Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO):** al igual que en la mineralización, se expresa en diferentes variables fisicoquímicas de las cuales se seleccionaron demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), coliformes totales y porcentaje de saturación del oxígeno, las cuales, en conjunto, recogen efectos distintos de la contaminación orgánica, tal como lo demuestra la ausencia de correla-

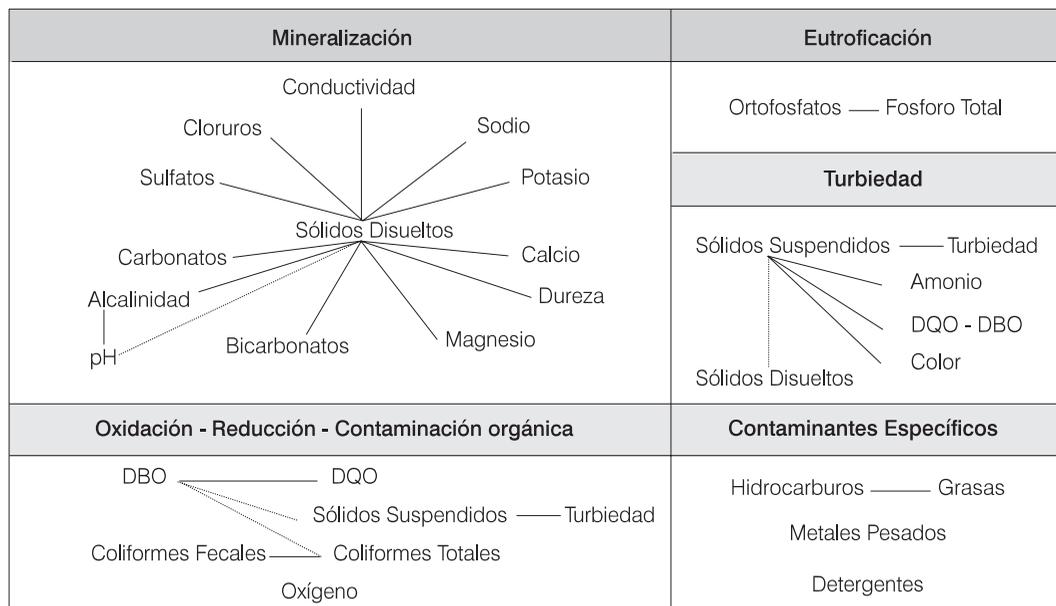


Figura 1. Principales características fisicoquímicas en aguas cotinentales correlaciones mas(—) y menos (-----) comunes.

ciones entre ellas.

- **Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS):** se determina tan sólo mediante la concentración de sólidos suspendidos. Si bien esta variable observó alguna correlación de importancia con la demanda de oxígeno (DBO y DQO) y con el amonio, se desagregó de las anteriores por cuanto estas últimas corresponden con claridad a procesos de contaminación orgánica, mientras que los sólidos suspendidos bajo muchas circunstancias, podrían perfectamente hacer referencia tan sólo a compuestos inorgánicos.

- **Índice de contaminación trófico (ICOTRO):** se determina en esencia por la concentración del fósforo total.

Como se observa, hay una alta correspondencia entre las variables involucradas en los ICO y aquellas definidas por otros autores en los ICA. De igual modo, las relaciones índices - concentración para las variables coincidentes, resultan muy próximas entre sí.

**Índice de contaminación por mineralización: ICOMI**

El ICOMI es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables elegidas, las cuales se definen en un rango de 0 - 1; índices próximos a cero (0) reflejan muy baja contaminación por mineralización, e índices cercanos a uno (1), lo contrario. En las Tablas 4 a 6 se presentan las concentraciones tomadas como base para la elaboración de los índices de cada variable, las cuales se grafican en las Figuras 2 a 4:

-  $ICOMI = 1/3 (I_{Conductividad} + I_{Dureza} + I_{Alcalinidad})$

-  $I_{CONDUCT.}$ : se obtiene a partir de la siguiente expresión:

.  $Log_{10} I_{Conduct.} = -3,26 + 1,34 Log_{10} \text{ conductividad } (\mu S/cm).$

.  $I_{Conduct.} = 10^{Log. I. Conduct.}$

. conductividades mayores a 270  $\mu S/cm$ , tienen un índice de conductividad = 1.

-  $I_{DUREZA}$ : se obtiene a partir de la siguiente expresión:

-  $Log_{10} I_{Dureza} = -9,09 + 4,40 Log_{10} \text{ dureza } (g \cdot m^{-3})$

-  $I_{Dureza} = 10^{Log. I. Dureza}$

- durezas mayores a 110  $g \cdot m^{-3}$  tienen  $I_{Dureza} = 1$

- durezas menores a 30  $g \cdot m^{-3}$  tienen  $I_{Dureza} = 0$

-  $I_{ALCALINIDAD}$ : se obtiene a partir de la siguiente expresión:

-  $I_{Alcal.} = -0,25 + 0,005 \text{ alcalinidad } (g \cdot m^{-3})$

- alcalinidades mayores a 250  $g \cdot m^{-3}$  tienen  $I_{Alcal.} = 1$

- alcalinidades menores a 50  $g \cdot m^{-3}$  tiene  $I_{Alcal.} = 0$

Así, por ejemplo, una muestra de agua con conductividad 150  $\mu S/cm$ , dureza 160  $g \cdot m^{-3}$  y alcalinidad 30  $mg \cdot m^{-3}$ , tiene los siguientes índices:

-  $I_{Conductividad} = 0,45$

-  $I_{Dureza} = 1$

-  $I_{Alcalinidad} = 0$

$ICOMI = 1/3 (0,45 + 1 + 0) = 0,48$

Los índices de cada variable pueden obtenerse en forma muy cercana a partir de las figuras presentadas.

Tabla 4. Concentraciones de referencia de conductividad para el ICOMI.

CONDUCTIVIDAD ( $\mu S/cm$ )		
Concentración	Fuente	Calidad
300 - 18.000	CFS	Salobres
3.500 - 100.000 +	CFS	Saladas
Hasta 400	RD	Deseable potable
Hasta mineralización	RD	Tolerable potable
400	CEE	Consumo humano
20 - 50	R	Alta montaña
150 - 200	R	Cuenca baja

Tabla 5. Concentraciones de referencia de dureza para el ICOMI.

DUREZA (g·m <sup>-3</sup> )		
Concentración	Fuente	Calidad
150	R.D.	Deseable potable
60	CEE	Potable mínimo
60 - 120	USA	Abastecimiento humano (deseable)
300 - 500	USA	Abastecimiento humano (permisible)
< 10	N y V	Oligotrofia
10 - 20	N y V	Productividad débil
20 - 40	N y V	Productividad mediocre
40 - 80	N y V	Productividad media
80 - 110	N y V	Eutrofia
110 - 150	N y V	Aguas duras
> 150	N y V	Aguas incrustantes muy duras

Tabla 6. Concentraciones de referencia de alcalinidad para el ICOMI.

ALCALINIDAD (g·m <sup>-3</sup> )		
Concentración	Fuente	Calidad
0 - 40	CFS	Dulces blandas
41 - 200	CFS	Dulces blandas
> 200	CFS	Salobres
> 200	CFS	Saladas
30	CEE	Potable mínimo
20 - 200	USA	Vida piscícola
30 - 500	USA	Abastecimiento humano
< 25	N y V	Alta montaña
25 - 50	N y V	Curso medio
50 - 100	N y V	Macizos cristalinos
100 - 150	N y V	Curso inferior
150 - 250	N y V	Aguas muy productivas
250 - 350	N y V	Aguas contaminadas
> 350	N y V	Aguas contaminadas

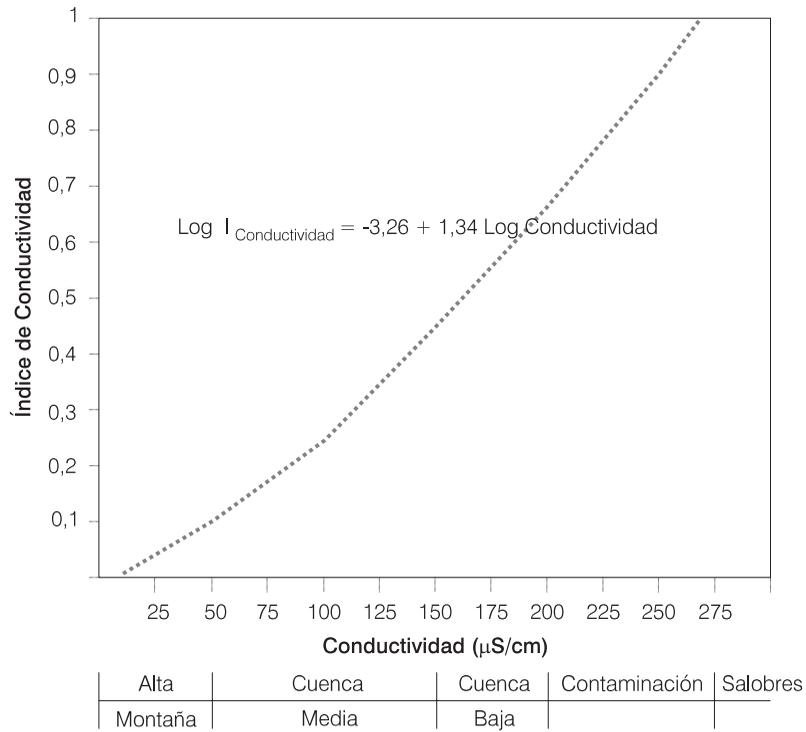


Figura 2. Índice de contaminación para la Conductividad

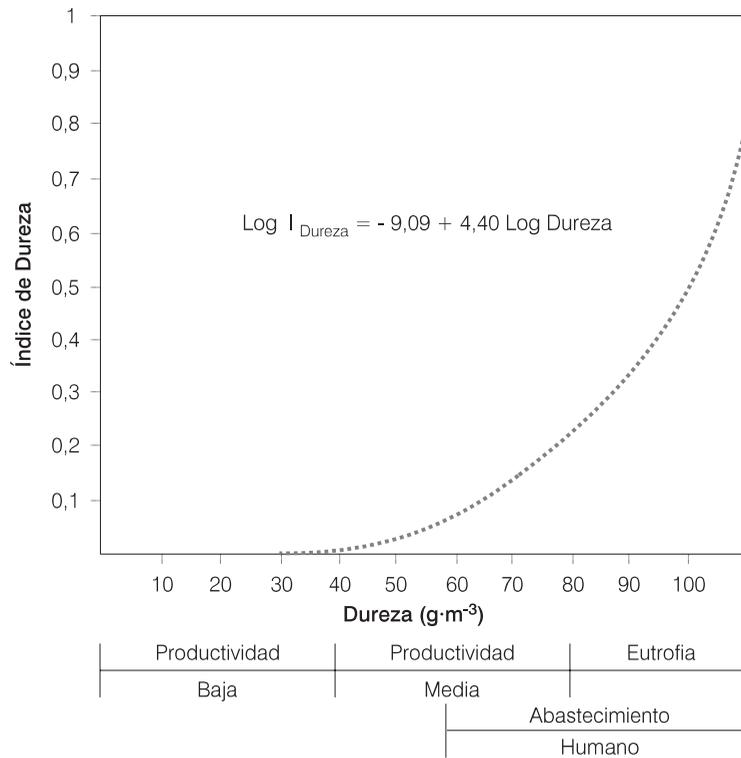


Figura 3. Índice de contaminación para la Dureza

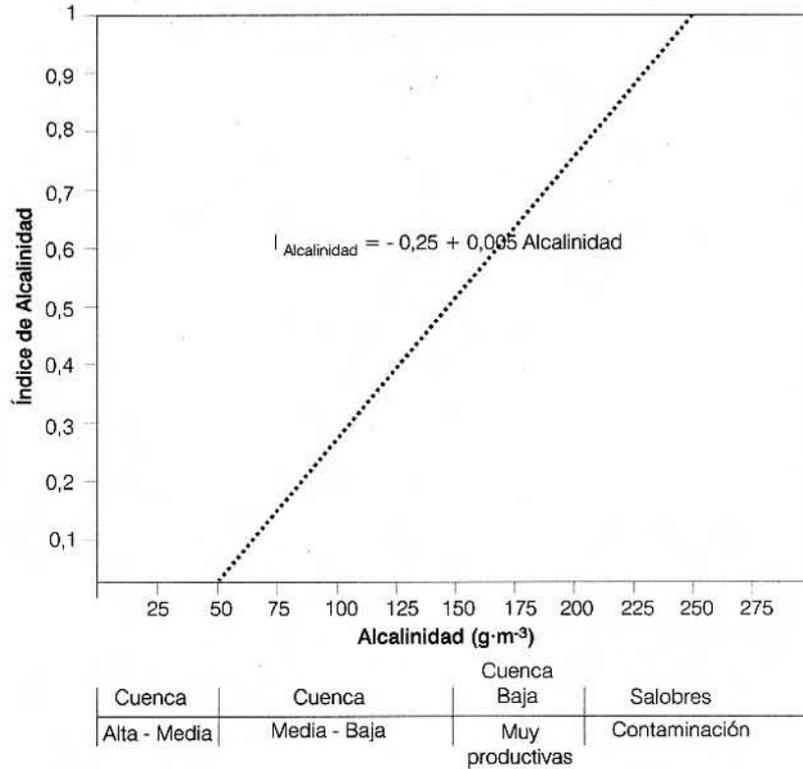


Figura 4. Índice de contaminación para la Alcalinidad

**Índice de contaminación por materia orgánica: ICOMO**

El ICOMO, al igual que el ICOMI, es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables elegidas. En las Tablas 7 a 9 se exponen los parámetros tomados como referencia, cuyas variables individuales se grafican en las Figuras 5 a 7:

$$ICOMO = 1/3 (I_{DBO} + I_{Coliformes\ totales} + I_{Oxígeno\ \%})$$

-  $I_{DBO}$ : se obtiene a partir de la siguiente expresión:

- .  $I_{DBO} = -0,05 + 0,70 \text{ Log}_{10} \cdot DBO (g \cdot m^{-3})$
- . DBO mayores a  $30 g \cdot m^{-3}$  tienen  $I_{DBO} = 1$
- . DBO menores a  $2 g \cdot m^{-3}$  tienen  $I_{DBO} = 0$

-  $I_{COL. TOT.}$ : se obtiene a partir de la siguiente expresión:

- .  $I_{COL. TOT.} = -1,44 + 0,56 \text{ Log}_{10} \text{Col. tot.} (NMP \cdot 100cm^{-3})$
- . coliformes totales mayores a  $20.000 NMP \cdot 100cm^{-3}$  tienen  $I_{COL. TOT.} = 1$
- . coliformes totales menores a  $500 NMP \cdot 100cm^{-3}$  tienen  $I_{COL. TOT.} = 0$

-  $I_{OXIGENO \%}$ : se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

- .  $I_{Oxígeno \%} = 1 - 0,01 \text{ oxígeno \%}$
- . oxígenos (%) mayores a 100 % tienen  $I_{Oxígeno \%} = 0$

Es importante señalar, que de manera general en los sistemas lóticos porcentajes de saturación mayores a 100% son ventajosos o indicativos de una muy buena capacidad de reaeración de los cursos hídricos. Para sistemas lénticos pueden reflejar graves problemas de eutrofización, por lo que sería aconsejable realizar determinaciones tanto en el día como en la noche. Para ciénagas eutrofizadas con porcentajes de saturación de oxígeno mayores a 100%, se sugiere emplear la siguiente expresión:

$$I_{Oxígeno \%} = 0,01 \text{ oxígeno \%} - 1$$

**Índice de contaminación por sólidos suspendidos: ICOSUS**

$$ICOSUS = -0,02 + 0,003 \text{ sólidos suspendidos } (g \cdot m^{-3})$$

- . sólidos suspendidos mayores a  $340 g \cdot m^{-3}$  tienen  $ICOSUS = 1$
- . sólidos suspendidos menores a  $10 g \cdot m^{-3}$  tienen  $ICOSUS = 0$

Tabla 7. Concentraciones de referencia de DBO para el ICOMO.

DBO ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )		
Concentración	Fuente	Calidad
0,75 - 2	TVA	Recreación
1,5 - 3,5	TVA	Recreo, pesca
< 1	N y V	Normal
1 - 3	N y V	Aceptable
3 - 6	N y V	Calidad dudosa
> 6	N y V	Anormal
1 - 3	M	Oligosaprobio
3,5 - 12	M	Mesosaprobio
15 - 100	M	Polisaprobio
> 100	M	Eusaprobio

Tabla 8. Concentraciones de referencia de coliformes totales para el ICOMO.

COLIFORMES TOTALES (NMP·100 $\text{cm}^{-3}$ )		
Concentración	Fuente	Calidad
50 - 100	TVA	Recreación
100 - 1.000	TVA	Recreo, pesca
0	RD	Potable
1.000	MS	Potable (desinfección). Contacto primario
5.000	MS	Agrícola. Contacto secundario
20.000	MS	Potable (tratamiento convencional)

Tabla 9. Concentraciones de referencia de oxígeno para el ICOMO.

OXÍGENO ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )		
Concentración	Fuente	Calidad
6,5 - 7,5	TVA	Recreación
5 - 7	TVA	Recreo, pesca
> 3	USA	Abastecimiento humano
> 4	USA	Vida piscícola
>4	MS	Preservación flora y fauna. Aguas cálidas
> 5	MS	Aguas frías
>75 %	CEE	Consumo humano
>70 %	MS	Contacto primario y secundario (recreación)

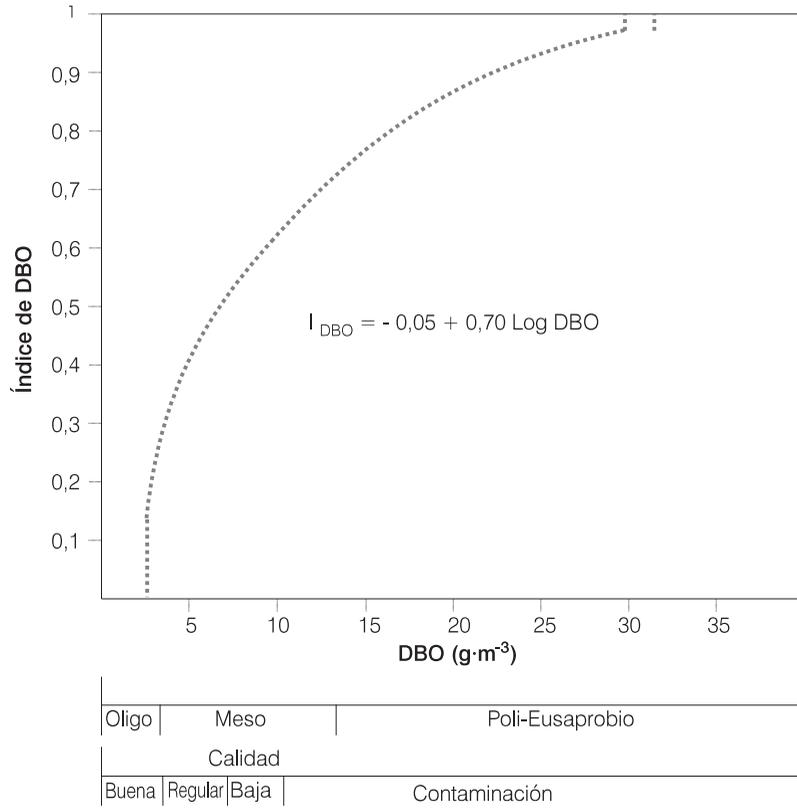


Figura 5. Índice de contaminación para la DBO.

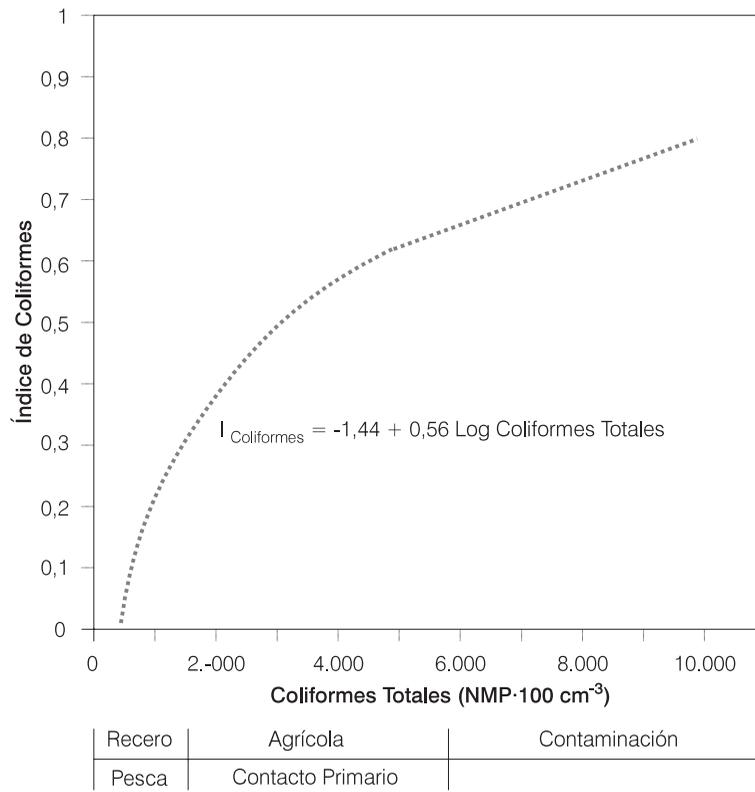


Figura 6. Índice de contaminación para Coliformes totales

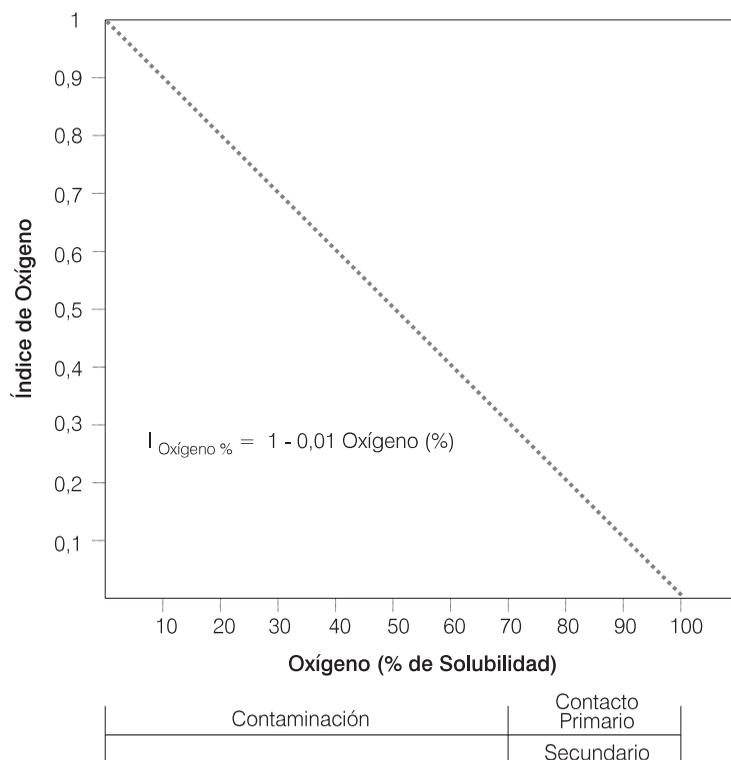


Figura 7. Índice de contaminación para el oxígeno (%).

Las concentraciones de referencia empleadas para llegar a las expresiones previas se presentan en la Tabla 10. En la Figura 8, por su parte, se diagrama la relación reseñada.

### Índice de contaminación trófico: ICOTRO

El ICOTRO se fundamenta en la concentración del fósforo total. A diferencia de los índices anteriores, en los cuales se determina un valor particular entre 0 y 1, la concentración del fósforo total define por sí misma una categoría discreta a saber:

Oligotrófico	< 0,01	(g·m <sup>-3</sup> )
Mesotrófico	0,01 - 0,02	(g·m <sup>-3</sup> )
Eutrófico	0,02 - 1	(g·m <sup>-3</sup> )
Hipereutrófico	> 1	(g·m <sup>-3</sup> )

Las concentraciones de referencia empleadas se exhiben en la Tabla 11.

### Correlaciones entre los índices

Con el propósito de verificar la bondad de los índices, así como su independencia, se llevaron a cabo

correlaciones ( $r$ ) entre ellos en 11 de los estudios referidos. Dichos cálculos se presentan en las Tablas 12 y 13.

De las correlaciones promedias anteriores solamente se destaca aquella relativa a ICOSUS e ICOTRO durante la época de lluvias, aunque una y otra se explican únicamente en un 16% (coeficiente de determinación  $r^2 \times 100$ ). Por lo demás, todos los valores son próximos a cero (0) independientemente de la época climática, lo que indica que el papel que desempeñan los índices de contaminación es distinto entre sí, hecho que les imprime un carácter complementario: mientras unos explican una situación ambiental, los otros identifican situaciones de otra índole.

Es importante anotar que los procesos de contaminación orgánica no están asociados a incrementos de sólidos suspendidos (a pesar de las correlaciones entre esta última con DBO, DQO y amonio) o disueltos, ni tampoco a procesos de eutrofización. Así mismo, el aumento de sólidos suspendidos no está relacionado con los sólidos disueltos ni con llegada de nutrientes (salvo durante lluvias); tampoco hay asociación entre estos últimos y la mineralización de las aguas.

Tabla 10. Concentraciones de referencia de sólidos suspendidos para el ICOSUS.

Índice de Sólidos Suspendidos		
Concentración	Fuente	Calidad
<10	N y V	Muy buena cuenca alta
10 - 25	N y V	Normal. cuenca alta - media
25 - 50	N y V	Buena. Cuenca media - baja
50 - 75	N y V	Buena. Cuenca baja
75 - 150	N y V	Media. Contaminados
150 - 300	N y V	Mediocre. Contaminados
> 300	N y V	Muy contaminados

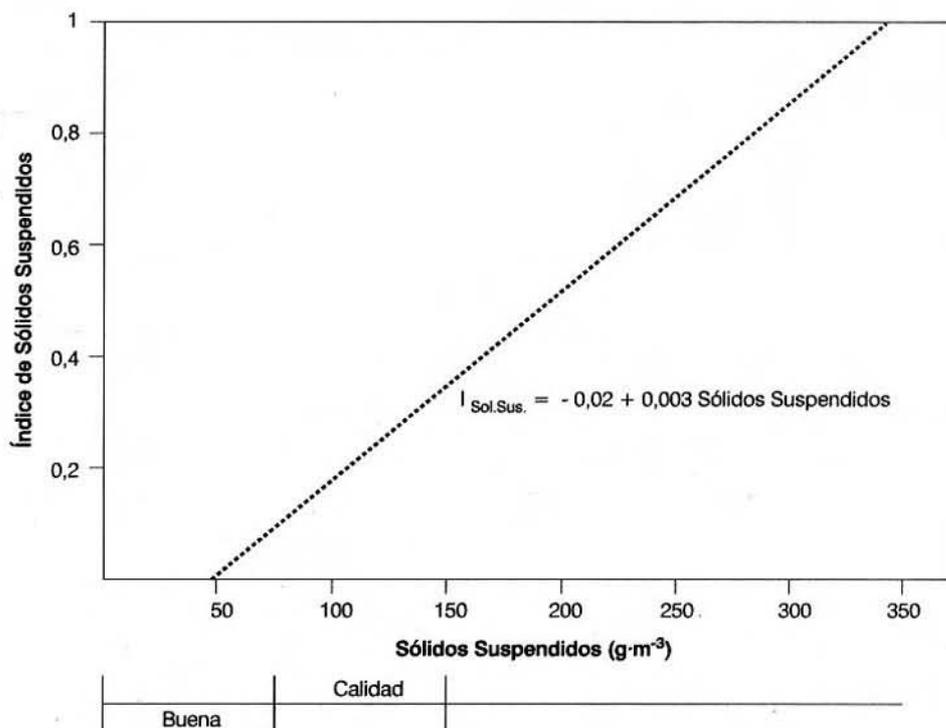


Figura 8. Índice de contaminación para sólidos suspendidos

## APLICACION

A manera ilustrativa se han seleccionado cuatro estaciones del estudio Ocenca - Ecotest (en preparación), en los cuales se observa el papel claro de desagregación que ejercen los diferentes índices de conta-

minación (Tabla 14).

Como se observa en el ejemplo expuesto, hay una clara identificación de las diferentes situaciones ambientales presentes en cada curso estudiado: el caño Iquí muestra contaminación tan sólo en su estado trófico, el río Suárez hace lo propio en materia orgánica y

Tabla 11. Concentraciones de referencia de fósforo para el ICOTRO.

FOSFORO TOTAL (g·m <sup>-3</sup> )		
Concentración	Fuente	Calidad
0,17	RD	Deseable potable
< 0,01	USEPA	Oligotrófica
0,01 - 0,02	USEPA	Mesotrófica
> 0,02	USEPA	Eutrófica

Los parámetros tomados como guía provienen de:

Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. España 1992 (1).

(1) TVA: Tennessee Valley Authority

(1) CFS: Canadian Forestry Service

(1) RD: Real Decreto

(1) CEE: Comunidad Económica Europea

(1) N y V: Nisbet y Verneaux

(2) M: Margalef, 1983

(3) MS: Ministerio Salud, 1984.

(4) USEPA: En: Thomann y Mueller, 1987. (5) R:Roldán, 1987.

Tabla 12. Valores de las correlaciones entre los índices para todas las épocas climáticas consideradas.

		S	S	S	S	S	LL	LL	LL	LL	T	T
ICOMI	ICOMO	0,058	0,055	-0,010	0,192	0,233	0,302	0,063	-0,298	0,404	0,140	-0,160
ICOMI	ICOSUS	0,002	0,217	-0,232	0,011	-0,103	0,327	0,039	-0,224	0,757	0,295	-0,030
ICOMI	ICOTRO	0,533	0,040	-0,363	0,089	0,042	-0,190	0,145	0,093	0,347	-0,057	0,244
ICOMO	ICOSUS	0,002	0,123	-0,063	0,449	-0,141	0,544	0,111	-0,137	0,211	0,376	0,192
ICOMO	ICOTRO	-0,058	0,220	-0,063	0,175	0,145	0,210	0,038	-0,061	0,008	-0,002	0,130
ICOSUS	ICOTRO	-0,122	0,430	-0,238	0,549	0,028	0,298	0,356	0,349	0,602	-0,098	0,201

S: Sequía; LL: Lluvias; T: Transición Lluvias - Sequía

Tabla 13. Valores de las correlaciones medias entre los índices para cada época climática, así como global.

		Media Sequía	Media Lluvia	Media Transición Lluvia - Sequía	Media Global
ICOMI	ICOMO	0,106	0,118	-0,010	0,089
ICOMI	ICOSUS	-0,021	0,225	0,132	0,096
ICOMI	ICOTRO	0,068	0,099	0,094	0,084
ICOMO	ICOSUS	0,074	0,182	0,284	0,118
ICOMO	ICOTRO	0,084	0,049	0,064	0,067
ICOSUS	ICOTRO	0,129	0,401	0,052	0,214

Tabla 14. Desagregación de los valores de los ICO aplicados a un estudio real (Ocensa-Ecotest, en preparación).

VARIABLES	Estaciones (Código)			
	Caño Iquí (310)	Río Suárez (803)	Río Guaguaquí (1001)	Arroyo Santo DOMINGO (1001)
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	25,1	188,8	547	384
Alcalinidad ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	10	38	113	173
Dureza ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	6	42	116	146
Oxígeno (%)	90	11	90	79
DBO ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2	5	2	1
Coliformes Totales (NMP-100 $\text{cm}^{-3}$ )	27	> 24 x 106	230	230000
Sólidos Suspendidos ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	5	26	574	36
Fósforo Total ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1,49	0,12	0,02	0,38
ICOMI	0,01	0,21	0,77	0,87
ICOMO	0,09	0,78	0,09	0,40
ICOSUS	0,00	0,06	1,00	0,09
ICOTRO	Hipereutrófico	Eutrófico	Mesotrófico	Eutrófico

trofia, el río Guaguaquí en mineralización y sólidos suspendidos, y el arroyo Santo Domingo en mineralización y trofia.

Cabe mencionar que la casi totalidad de las estaciones exhiben concentraciones de fósforo que denotan eutrofización (tan sólo cuatro estaciones de las 74 evaluadas mostraron estado mesotrófico, las restantes son eutróficas o hipereutróficas), hecho que señala un alto estado de intervención antrópica a lo largo del corredor estudiado (Cusiana-Coveñas).

## CONCLUSIONES

- Los índices de contaminación (ICO) constituyen una herramienta poderosa de fácil determinación, que prestan gran utilidad en la caracterización de la calidad de las aguas continentales, tarea que realizan con mayor objetividad y claridad que los tradicionales índices de calidad (ICA). Su empleo cobra mayor relevancia que los componentes principales cuando se estudia un reducido número de cursos y se complementa con éste cuando se caracterizan numerosas estaciones.

- El cálculo de un único índice lleva implícito una pérdida sustancial de información que genera, en muchas circunstancias, mayor confusión en la interpretación de los resultados. Los cuatro índices de contaminación formulados son complementarios y, por lo tanto, permiten visualizar situaciones ambientales perfectamente distintas.
- Gracias a la disgregación de los índices, se pueden evaluar situaciones específicas de contaminación mediante el empleo de alguno(s) de ellos, monitoreando tan sólo las variables que conciernen a éste. Este hecho permite, por un lado, ahorro de costos y, por el otro, resultados concretos en relación al problema bajo estudio.
- Con el desarrollo de los cuatro índices de contaminación presentados, se potencia enormemente la búsqueda e identificación de organismos bioindicadores. La contaminación por materia orgánica que usualmente es la de mayor interés, puede ahora definirse en forma concreta, sin interferencias o ruidos causados por el comportamiento de otras variables, tal como ha venido sucediendo con la aplicación de los ICA.

- La contaminación orgánica mostró diferentes matices y, por ende, no puede ser recogida en una única variable. Por tal razón, el ICOMO se formuló a partir de tres variables con comportamientos no correlacionados, oxígeno, DBO<sub>5</sub> y coliformes totales, las cuales conjugan un espectro amplio de los fenómenos que ocasionan estos procesos de contaminación.
- La mineralización de las aguas contrariamente, es un fenómeno que de, manera general, involucra al unísono la disolución de aniones y cationes en las aguas y que, por ende, puede ser recogida en la conductividad o en la concentración de sólidos disueltos. La inclusión de tres variables en la formulación del ICOMI, obedece a los diferentes efectos que sobre las aguas y las comunidades bióticas arrojan los diferentes iones.
- El ICOSUS refleja la concentración de sólidos suspendidos y muestra relación directa con el ICOTRO (concentración de fósforo total) durante la época de lluvias, aunque el porcentaje de explicación de una variable en otra es muy bajo.

## REFERENCIAS

- BP. Exploration - Ecotest, 1996a. *Monitoreo hidrobiológico del área de influencia de los campos Cusiana y Cupiagua, Departamento del Casanare*, Santafé de Bogotá.
- BP. Exploration - Ecotest, 1996b. *Monitoreo hidrobiológico del área de Influencia del Bloque Piedemonte, Departamento del Casanare*, Santafé de Bogotá.
- Behar, R., Zúñiga, M. del C. y Rojas, O., 1997. "Análisis y valoración del índice de calidad de agua (ICA) de la NSF: El caso de los ríos Cali y Meléndez (Cali - Colombia)", *Seminario Internacional sobre Macroinvertebrados Bentónicos como Bioindicadores de la Calidad del agua*, Cali - Colombia.
- Boulton, A.J. and Lake, P. S., 1990. "The ecology of two intermittent streams in Victoria, Australia. I. Multivariate analyses of physicochemical features", *Freshw. Biol.*, 24: 123 - 141.
- El-Shaarawi, A. H., Elliott, J. R., Kwiatkowski, R. E. and Peirson, D. R., 1986. "Association of chlorophyll a with physical and chemical factors in Lake Ontario, 1967-1981", *Statistical Aspects of Water Quality Monitoring*, Amsterdam, Elsevier, 273 - 291.
- George, J., Viña, G., Ramírez, A. y Mojica, J. I., 1991. *Manual de métodos de monitoreo biológico con aplicación en la industria del petróleo. Componente acuático*, Ecopetrol, Bogotá.
- Henaó, A.M., 1987. "El disco Secchi y el estado trófico". *AINSA*, 7 (1).
- Johnson, R. A. and Wichern, D.W., 1982. *Applied Multivariate Statistical Analysis*, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs.
- Johnston, C. A., Detenbeck, N.E. and Niemi, G. J., 1990. "The cumulative effect of wetlands on stream water quality and quantity. A landscape approach", *Biogeochemistry*, 10: 105 - 141.
- Kendall, M. G., 1975. *Multivariate Analysis*, New York, Hafner Press.
- Manahan, S. E., 1991. *Environmental Chemistry*, 5a. ed. Lewis Pub.
- Margalef, R., 1983. *Limnología*, Barcelona, Omega.
- Martínez de Bascaran, G., 1976. "El índice de calidad del agua", *Ingeniería Química*: 45 - 49.
- Matthews, R. A., Mattheus, G. B. and Ehinger, W.J., 1991. "Classification and ordination of limnological data: a comparison of analytical tools", *Ecol. Model.*, 53: 167-187.
- Ministerio de Salud, 1984. *Decreto 1594*, Colombia.
- MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes de España), 1992. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*.
- Ocensa - Ecotest, 1996. "Monitoreo de los cuerpos de agua en el área de influencia del Oleoducto El Porvenir - Vasconia", Santafé de Bogotá.
- Ocensa - Ecotest (En preparación). "Monitoreo hidrobiológico del área de influencia del Oleoducto Cusiana - Coveñas", Santafé de Bogotá.
- Oleoducto de Colombia - Ecopetrol ICP, 1993. "Estudio de línea base. Componentes biológicos y fisicoquímicos de los ecosistemas acuáticos", *Biología Aplicada, Ecología*, Alberto Ramírez.
- Overall, J. E. and Klett, C. J., 1972. *Applied Multivariate Analysis*, New York, Mc Graw-Hill.
- Prat, N., González, G. and Millet, X., 1986. "Comparación crítica de dos índices de calidad del agua: ISQA y BILL", *Tecnología del Agua*, 31: 33 - 49.

- Ramírez, A., 1988. "Lineamientos y estadísticas para estudios biológicos de impacto ambiental", *Contrato 64/87 Inderena*, Colombia, 455 p.
- Roldán, G., 1992. *Fundamentos de limnología neotropical*, Medellín. Ed. Universidad de Antioquia.
- Schetagne, R., 1989. "The use of multivariate methods in the interpretation of water quality monitoring data of a large northern reservoir", en *Statistical Aspects of Water Quality Monitoring*, Amsterdam, Elsevier: 30 - 43.
- Simoneau, M., 1986. "Spatial variability in the water quality of Québec Rivers", en *Statistical Aspects of Water Quality Monitoring*, Amsterdam, Elsevier: 117 - 135.
- Thomann, R. V. and Mueller, J. A. 1987. *Principles of surface water quality modeling and control*, New York, Harper and Row Pub.
- Viña, G., Ramírez, A., Lamprea, L., Garzón, B., Schmidt, U., Rondón, E. y Flores, C., 1991. *Ecología de la Ciénaga de Zapatosa y su relación con un derrame de petróleo*, Ecopetrol-DCC, Cúcuta
- Zúñiga, M. del C., Rojas, A. M. and Serrato, C., 1994. "Interrelación de indicadores ambientales de calidad en cuerpos de aguas superficiales del Valle del Cauca". *Rev. Col. de Entom.*, 20 (2): 124 - 130.