

ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS CONTINENTALES Y VERTIMIENTOS. FORMULACIONES.

RAMÍREZ[‡], R. RESTREPO* y M. CARDEÑOSA

[‡] Ecotest Ltda., Carrera 15#29-37, Santafé de Bogotá, Cundinamarca
Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia
E-mail: rrestrep@ecopetrol.com.co

Como complemento a un desarrollo previo, publicado por Ramírez *et al.*, 1997, y gracias a los análisis de información recopilada en muestreos de cuerpos de aguas, se formulan nuevos índices de contaminación (ICO) para la caracterización de aguas naturales y vertimientos, todos ellos independientes de otros ICO definidos con anterioridad y que brindan información complementaria sobre la calidad de las aguas. Se desarrolla un índice para el pH (ICOpH), que resulta complementario con aquellos durante la caracterización de aguas dulces naturales. Adicionalmente, se presenta un índice para la temperatura (ICOTEM), desarrollado para la evaluación de vertimientos y se fundamenta en la diferencia de temperatura entre el vertimiento y el cuerpo receptor. Por último, se formulan índices de contaminación para hidrocarburos aromáticos y alifáticos, componentes altamente susceptibles a su acumulación en organismos vivos. Estos índices se han desarrollado basados en aproximadamente 130 mediciones realizadas en muestras de tejidos de peces y en sedimentos, en desarrollo de monitoreos en cuerpos de agua que han sido afectados en grado diferente por la industria petrolera, así como de otras actividades antrópicas.

Contamination indexes (ICO) for characterization of natural water bodies and industrial discharges have been formulated in previous works by Ramírez, *et al.*, 1997. In this work, complementary indexes not correlated with other ICOs previously developed are established thus resulting in a complementary tool to be applied in the interpretation and characterization on continental surface water bodies. First, a pH index (ICOpH) is obtained to determine pH incidence on water quality interpretation. A temperature index (ICOTEM) is also obtained to evaluate effluent incidence on receiving water bodies. ICOTEM is based on temperature difference of the wastewater discharge and the water body. Finally, indexes for the evaluation of aromatic and aliphatic hydrocarbons are also developed based on data collected on sediments and fish tissue samples. These hydrocarbon compounds are highly viable to accumulate and produce long-term detrimental effects on living organisms. These latter indexes have been developed based on data of nearly 130 samples collected during monitoring campaigns in streams and water bodies affected by discharges of the petroleum industry or by accidental spills of crude oil or hydrocarbon by-products in colombian streams; it is also possible that anthropic influence other than petroleum discharges might be affecting the streams included in the monitoring campaigns.

Palabras clave: contaminación, índices de calidad de las aguas, diagnóstico ambiental, impacto ambiental, vertimientos industriales.

* A quien debe ser enviada la correspondencia

INTRODUCCIÓN

Los índices de calidad de las aguas (ICA) frecuentemente expuestos en la literatura, fueron formulados con el propósito de simplificar en un único valor, en la escala 0 - 1, la condición general de una muestra de agua, gracias a conjugar en ellos numerosas variables físicas y químicas de diferente índole (Martínez de Bascaran, 1976, Prat *et al.*, 1986, MOPT 1992).

No obstante, el desarrollo de índices de contaminación (ICO) (Ramírez *et al.*, 1997) ha demostrado enormes ventajas sobre los ICA, pues estos últimos involucran, en un solo parámetro, numerosas variables, hecho que conlleva a diversos problemas conceptuales y de interpretación tales como:

- Una muestra de agua puede aparecer como de buena calidad, a pesar de que alguna(s) variable(s) exhiban un elevado grado de contaminación, puesto que la presencia conjunta de múltiples variables esconden o enmascaran tal condición. La ponderación de la incidencia de cada uno de estos factores, en la determinación final del ICA, es subjetiva y, por ende, susceptible de proporcionar resultados diversos bajo las mismas condiciones, porque depende del criterio del profesional a cargo de la investigación y evaluación de los resultados obtenidos.
- Dos cuerpos de agua con condiciones fisicoquímicas ampliamente opuestas pueden obtener un igual valor del índice de calidad ICA. Por tanto, éstos pueden conducir a falsas interpretaciones.
- Sobre un programa de monitoreo, en un cuerpo de agua particular, algunas variables podrían mejorar su calidad en el tiempo, mientras otras podrían exhibir mayor deterioro. Unos y otros eventos no se harán explícitos y, por tanto, quedan ocultos y no podrá conocerse con precisión lo que sucede en el cuerpo de agua evaluado.
- Los ICA no permiten esclarecer condiciones particulares, por lo que el investigador debe retornar a los registros fisicoquímicos primarios.
- No permiten relacionar organismos indicadores con problemas ambientales específicos.

El desarrollo de índices de contaminación, para valoración de la calidad de las aguas continentales, fue abordado por Ramírez *et al.*, (1997), a partir de los resultados arrojados por la estadística multivariada de análisis de componentes principales, el cual ha sido

usado de manera recurrente en otras latitudes y en Colombia para la caracterización de aguas dulces, cuicolas y marinas (Margalef, 1983, Simoneau, 1986, El-Shaarawi *et al.*, 1986, Ramírez, 1988, Boulton y Lake, 1990, Johnston *et al.*, 1990, George *et al.*, 1991, Matthews *et al.*, 1991, Viña *et al.*, 1991).

Esta técnica estadística fue aplicada en extensos programas de monitoreo, implementados por la industria del petróleo sobre diferentes regiones de Colombia (Oleoducto de Colombia - Ecopetrol ICP., 1993, Ocesa - Ecotest, 1997, BP Exploration - Ecotest, 1998) y gracias a ellos se identificaron correlaciones frecuentes y reiteradas entre múltiples variables físicas y químicas, las cuales dieron origen a la formulación de los siguientes cuatro índices de contaminación:

- ICOMI o índice de contaminación por mineralización, que integra conductividad, dureza y alcalinidad.
- ICOMO o índice de contaminación por materia orgánica, conformado por demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes totales y porcentaje de saturación del oxígeno.
- ICOSUS o índice de contaminación por sólidos suspendidos.
- ICOTRO o índice de contaminación trófico, el cual se calcula con base en la concentración de fósforo total.

En su estudio, Ramírez *et al.* (1997) demostraron que tales índices son independientes y complementarios, por tanto, descubren problemas ambientales disímiles, subsanan todos y cada uno de los problemas previamente referidos para los ICA y permiten realizar una rápida interpretación del estado de la calidad del cuerpo de agua evaluado.

La aplicabilidad de estos índices ha sido verificada al interior de la industria del petróleo mediante las investigaciones adelantadas por Ecopetrol-ICP (1999a, b, c, d), las cuales han permitido observar las ventajas de la aplicación de las interpretaciones arrojadas por los índices formulados a la fecha. De la misma manera, estos estudios en los cuales se han aplicado tales ICO's, han permitido identificar la necesidad de formular dos nuevos índices de contaminación, para los parámetros pH y temperatura, con el fin de complementar la caracterización tanto de las aguas continentales como de los vertimientos, respectivamente. Estas variables desempeñan un papel fundamental en la caracterización de las aguas naturales.

El interés para formular un índice de contaminación relativo a la temperatura (ICOTEM), está enfocado tácitamente a la evaluación de vertimientos y no como en los casos anteriores, a la caracterización de aguas dulces naturales. Ello por cuanto las temperaturas de numerosos vertimientos son elevadas a causa de su uso en refrigeración u otros procesos industriales. Aunque en el caso de los embalses, sin embargo, las aguas de turbinas son tomadas de la parte profunda, por lo que son reincorporadas al curso con temperaturas consistentemente menores a éstos.

De acuerdo con la normatividad ambiental colombiana sobre vertimientos (Decreto 1594/84), la temperatura debe ser inferior o igual a 313 K (40°C) en el vertimiento, independientemente de la altitud a la cual se sitúe la fuente emisora. Evidentemente, dicha temperatura a nivel del mar causaría menores impactos que a 2.000 ó 3.000 metros sobre el nivel del mar (msnm) y de allí el gran valor del ICOTEM expresado como un diferencial de temperaturas.

Es importante anotar que la temperatura de las aguas continentales lóaticas (cuerpos de agua corriente, como ríos, quebradas, caños, entre otros), en el trópico, depende fundamentalmente de la altitud tal como lo demostraron Ramírez y Viña (1998), quienes encontraron una relación lineal entre ellas, en la que por cada incremento de 1.000 metros se produce una reducción de 277,9 K (4,7°C), para el rango comprendido entre 0 y 3.000 msnm.

Sin embargo, al interior de esta relación, se observa una variación importante de aproximadamente $\pm 3,5$ grados de temperatura para una misma altitud (95% de confianza), la cual obedece a circunstancias naturales en que inciden la época climática y el comportamiento espacial previo del cuerpo de agua (pendiente media, altitud de nacimiento de la cuenca).

Adicionalmente, es claro que en los sistemas lénticos (aguas lentas y confinadas como ciénagas, lagunas, estuarios, entre otros), también existe un rango amplio de variación, tanto por las causas referidas como por la dinámica misma del sistema (tasa de entrada y salida del agua y tiempo de retención), además de propiedades morfométricas de la cubeta (área superficial y profundidad). Por lo anterior, es claro que esta relación puede ser perfectamente diferente a la de los sistemas lóaticos.

En razón de lo anterior, el ICOTEM se formuló con base en la diferencia de temperatura entre el vertimien-

to y el cuerpo receptor y no como en los índices previos, donde se definió un nivel de contaminación a cada valor de la variable que conforma cada ICO (hecho coincidente con los ICA). Este cambio de formulación busca evaluar si un cauce de alta montaña se vería impactado por vertimientos con aguas cálidas, o cuerpos cálidos con vertimientos de bajas temperaturas.

Adicionalmente a estos dos índices, se formularon índices relativos a los hidrocarburos alifáticos y aromáticos desarrollados para sedimentos y tejidos de peces, gracias a la información acumulada para aguas dulces en Colombia. En la interpretación de las concentraciones obtenidas en estos componentes se han aplicado algunos análisis implementados en otras latitudes, tendientes a esclarecer la naturaleza biogénica y petrogénica de las concentraciones halladas. Infortunadamente los resultados de los análisis por estos métodos no han resultado confiables (Viña *et al.*, 1991).

Cabe referir que los ICO, a diferencia de los ICA, reflejan nula o baja contaminación cuando son próximos a cero y alta polución en la medida que se aproximan a uno. Sus rangos están asociados a los valores consignados en la Tabla 1

Tabla 1. Significancia de los índices de contaminación (ICO).

ICO	Contaminación	Escala de color
0 - 0,2	Ninguna	Azul
> 0,2 - 0,4	Baja	Verde
> 0,4 - 0,6	Media	Amarillo
> 0,6 - 0,8	Alta	Naranja
> 0,8 - 1	Muy alta	Rojo

La escala de color acorde con los ICO's determinados, permite una rápida lectura de los resultados tanto sobre tablas como sobre figuras.

Es importante hacer notar que, para calificar un vertimiento con calidad de no contaminación, no se requiere necesariamente de valores menores a 0,2 (sin contaminación), pues la capacidad ambiental del cuerpo receptor también debe ser tenida en cuenta. Por lo tanto, tal valor límite podría ser 0,4 (baja contaminación) de modo que el valor del ICO aguas abajo del emisor, podría

mantenerse en niveles de no contaminación. Esta premisa es similar a la expuesta en las concentraciones permisibles para vertimientos y diferentes usos de las aguas, en el marco del Decreto 1594/84 del Ministerio de Salud.

METODOLOGÍA

En el desarrollo de las formulaciones de los índices de contaminación para pH y temperatura, se tuvieron en cuenta diversas reglamentaciones colombianas e internacionales para diferentes usos del agua, registros de aguas naturales colombianas y relaciones expuestas por otros autores en los ICA. A pesar de que con frecuencia se observa en Colombia que las aguas naturales son confrontadas con estándares de calidad para aguas potables, dichos parámetros no fueron tenidos en cuenta pues constituyen una mala referencia para las aguas naturales.

Para el desarrollo de la formulación del índice de contaminación por pH (ICOpH) se tomaron como base los datos obtenidos del programa de monitoreo sobre el Bloque Piedemonte en el Casanare (BP Exploration - Ecotest 1998). El procedimiento que se siguió fue el mismo empleado por Ramírez *et al.* (1997), el cual se resume como:

- Asignación de valores de contaminación entre 0 y 1 a la escala del pH.
- Selección de una ecuación que permita relacionar el valor del parámetro y su incidencia en contaminación, y linealización de la misma.
- Aplicación del análisis de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados ordinarios, a la relación entre el ICOpH (escala 0 - 1) y el pH.
- Ajuste de la ecuación estimada.

Para la formulación del índice de contaminación de pH (ICOPH), se tomó como referencia la relación presentada para esta variable en el ICA de la Fundación para la Sanidad Nacional - INSF (MOPT 1992), con las siguientes modificaciones:

- Invertir la escala 0 - 1 a 1 - 0 (calidad - contaminación).
- Ajustar un ICO de 0 a un pH neutro.
- Ajustar los valores entre el extremo exterior y el promedio.

Para el cálculo del índice de contaminación por tem-

peratura (ICOTEM), se relacionó la diferencia de este parámetro (en grados centígrados) entre el agua en el cauce receptor y el vertimiento, con la condición de impacto o contaminación que dicho cambio representa. Como es natural, se trata de una relación directa porque hay mayor tensión en el afluente, cuando la diferencia de temperatura con el vertimiento es mayor. Definidos estos valores se procedió a la determinación del modelo, su linealización y el cálculo de los mínimos cuadrados.

Como parámetro de valoración particular para la actividad petrolera, se formularon, adicionalmente, índices de contaminación para hidrocarburos alifáticos y aromáticos desarrollados para sedimentos y tejidos de peces. Cabe indicar que los peces han demostrado ser los más susceptibles de manifestar impactos acumulativos en ecosistemas acuáticos.

La elaboración de estos índices se llevó a cabo con base en la información arrojada en investigaciones sobre la Ciénaga de Zapatosa (valle medio del río Magdalena, Departamento del Cesar) (Viña *et al.*, 1991) y en ciénagas del área de influencia del Oleoducto de Colombia (Oleoducto de Colombia - Ecopetrol, ICP, 1993).

El estudio de Zapatosa obedeció a un atentado contra el Oleoducto Caño Limón - Coveñas e incluyó noventa (90) muestras de sedimentos, cobijó áreas con presencia física de hidrocarburos donde se llevaban a cabo faenas de recolección de crudo, zonas medianamente afectadas por el derrame, áreas de control en esta Ciénaga y en la de Chilloa (vecina), así como muestras en la Ciénaga de Saloa afectada por un derrame similar cinco años atrás. De igual modo, se llevó a cabo el análisis de la concentración de hidrocarburos en tejido de cien peces colectados bajo diferentes grados de exposición al crudo y pertenecientes a variados eslabones tróficos.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH, Cartagena). Para la selección de los métodos analíticos Rowland y Robson (1990) anotan que los resultados obtenidos mediante gravimetría por extracción Soxhlet no corresponden en absoluto con los rangos expuestos y, por ello, sugieren no emplear dicha técnica de baja precisión. En tal sentido, la Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC (1982) hace una detallada revisión de los diferentes procedi-

mientos para la determinación de hidrocarburos en sedimentos y anota que los recomendados por el grupo de expertos sobre métodos, patrones e intercalibración (GEMSI) son: fluorescencia de rayos ultravioleta y cromatografía en fase gaseosa. Por lo tanto, se siguieron dichas técnicas de laboratorio: los alifáticos por cromatografía de gases con una columna de 6 m y los aromáticos por fluorometría con estándares de criceno y dilución en hexano.

El estudio de línea base del Oleoducto de Colombia, por otro lado, incluyó 40 muestras en sedimentos y 19 en peces colectados en sistemas con diferentes grados de intervención antrópica, pero no afectados por la industria del petróleo. Adicionalmente, y a causa de un derrame de petróleo, se evaluaron cuatro muestras en sedimentos y diez en peces. Los análisis fueron efectuados siguiendo el mismo procedimiento utilizado en Zapatosá.

El total de muestras de los dos estudios es entonces de 134 en sedimentos y 129 en peces y a partir de ellas se desarrollaron los índices de contaminación para hidrocarburos aromáticos, alifáticos resueltos, alifáticos no resueltos y alifáticos totales, tanto para sedimentos como para tejidos de peces.

Para la formulación de los índices se tuvo en cuenta también que Rowland y Robson (1990), refieren hasta 40 µg/g de hidrocarburos totales en sedimentos como de origen biológico. Con base en esta cifra, así como los estudios previamente citados, Ramírez y Viña (1998) definieron las categorías para sedimentos y tejidos de peces que aparecen en las Tablas 2 y 3, respectivamente.

Con base en los rangos previamente referidos, se procedió, entonces, a asignar valores a los índices de contaminación (0 a 1) y a elegir y linealizar los modelos que mejor se ajustaban en cada caso, para posterior-

Tabla 2. Significancia de la concentración de hidrocarburos en sedimentos.

Niveles de contaminación	Aromáticos (µg/g)	Alifáticos (µg/g)		Totales (µg/g)
		Resueltos	No resueltos	
Muy bajos	0 - 1	0 - 10	0 - 5	0 - 20
Bajos	> 1 - 2	> 10 - 30	> 5 - 15	> 20 - 40
Medios	> 2 - 5	> 30 - 60	> 15 - 30	> 40 - 80
Altos	> 5 - 8	> 60 - 100	> 30 - 100	> 80 - 200
Muy altos	> 8	0 > 100	> 100	> 200

Tabla 3. Significancia de la concentración de hidrocarburos en tejido de peces.

Niveles de contaminación	Aromáticos (µg/g)	Alifáticos (µg/g)		Totales (µg/g)
		Resueltos	No Resueltos	
Muy Bajos	0 - 1	0 - 10	0 - 5	0 - 20
Bajos	> 1 - 2	> 10 - 20	> 5 - 15	> 20 - 40
Medios	> 2 - 5	> 20 - 50	> 15 - 30	> 40 - 80
Altos	> 5 - 8	> 50 - 100	> 30 - 60	> 80 - 150
Muy Altos	> 8	0 > 100	> 60	> 150

mente aplicar los análisis de regresión lineal.

RESULTADOS

Los índices de contaminación formulados son:

Índice de contaminación por pH (ICOpH)

El análisis de los datos presentó un rango de variación natural promedio próximo a 2 unidades (1,95), lo cual señala que aproximadamente entre pH 6 y 8 (tomando como base pH = 7) es una condición perfectamente natural de las aguas. Tal variación se ha tenido en cuenta de tal modo que cambios en esta variable alrededor de dicho rango, no revisten deterioro en su condición. Para el análisis e interpretación del ICOpH, se encontró que éstos se pueden describir mediante una figura que describe una campana invertida en la cual, a valores superiores o inferiores de la neutralidad, se incrementa el nivel de contaminación (Figura 1).

El cálculo del índice es:

$$\text{ICOpH} = \frac{e^{-31,08 + 3,45 \text{ pH}}}{1 + e^{-31,08 + 3,45 \text{ pH}}}$$

Si pH es menor a 7 entonces $\text{pH}' = 14 - \text{pH}$ y se reemplaza pH' en la fórmula anterior.

El índice puede obtenerse en forma aproximada a partir de la Figura 1.

Para evaluar el comportamiento de este índice respecto a los índices de mineralización, materia orgánica, sólidos suspendidos y trofia, se correlacionó su valor con aquellos en cada uno de los muestreos realizados en el área de influencia del campo Cusiana-Cupiagua (35 estaciones) y el Bloque Piedemonte (24 estaciones) (BP Exploration - Ecotest, 1998), encontrándose los valores reportados en la Tabla 4.

No se observan correlaciones significativas y en forma repetida entre este índice y los restantes. La situación indica que se trata de un índice complementario e independiente que identifica condiciones ambientales particulares.

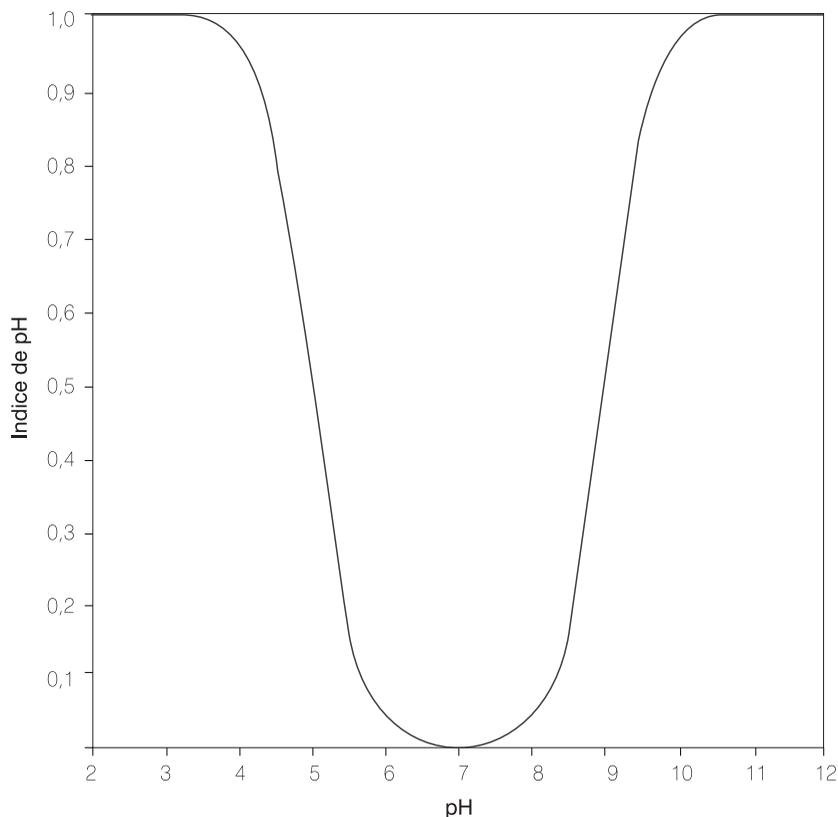


Figura 1. Índice de contaminación por pH

Tabla 4. Correlación entre el ICOpH y los demás índices de contaminación, y las diferentes épocas de muestreo para el área de influencia Cusiana - Cupiagua y bloque piedemonte.

Cusiana - Cupiagua				
	ICOMI	ICOMO	ICOSUS	ICOTRO
Marzo 1993	- 0,15	- 0,14	- 0,10	0,16
Agosto 1993	0,45*	0,16	0,33	0,04
Noviembre 1994	0,07	- 0,07	0,17	- 0,15
Mayo 1995	0,31	0,09	- 0,13	- 0,10
Noviembre 1995	- 0,23	0,01	- 0,10	- 0,27
Febrero 1996	- 0,19	- 0,13	- 0,07	- 0,07
Noviembre 1997	- 0,25	- 0,23	- 0,05	- 0,16
Agosto 1997	0,17	0,15	0,02	- 0,04
Abril 1997	0,18	0,04	- 0,01	- 0,08
Bloque Piedemonte				
Marzo 1994	- 0,13	- 0,30	- 0,20	0,55*
Agosto 1995	0,47*	0,19	0,63*	0,68*
Noviembre 1995	0,43*	0,10	- 0,15	0,0
Febrero 1996	0,01	- 0,25	- 0,08	1-0,13
Abril 1997	0,13	- 0,32	- 0,19	- 0,15
Agosto 1997	- 0,37	- 0,36	- 0,33	- 0,25
Noviembre 1997	0,11	0,20	--	0,40
PROMEDIO	0,06	- 0,05	0,02	0,03

* Significativos al 95% de confianza

Cabe mencionar que Ramírez *et al.* (1997) reportan ocasionales correlaciones entre el pH y variables propias de la mineralización, hecho que tiene lugar por la estrecha dependencia entre la alcalinidad de las aguas y con ello el sistema carbonatos, bicarbonatos y dióxido de carbono, con el pH. Sin embargo, al no aparecer correlaciones sistemáticas y reiteradas entre el pH y algunas otras variables propias de la mineralización como conductividad, sólidos disueltos, dureza y aniones y cationes como sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfatos y cloruros principalmente, el pH no fue incluido en el ICOMI y es por ello que es motivo del desarrollo de un ICO independiente.

Índice de contaminación por temperatura (ICOTEM)

Es importante notar que para el desarrollo del índice

se estudió el comportamiento individual de treinta cursos del Piedemonte Casanareño (BP Exploration - Ecotest 1998) y sobre ellos se encontró un rango de variación promedio de $\pm 3,5$ grados de temperatura, cifra que fue tomada en cuenta como *rango natural* dentro de un curso cualquiera. El límite superior se ajustó, en forma logarítmica, con un ICOTEM igual a 1 para incrementos de aproximadamente 288 K (15°C), cuantía semejante a la definida en los ICA.

La relación de tipo logarítmica indica que la contaminación térmica es mayor en los primeros cambios de la temperatura porque causa mayor daño en las comunidades. Welch (1996) comenta que en las zonas subtropicales los peces de aguas cálidas viven más cerca a sus límites de tolerancia ante incrementos de la temperatura que los de aguas frías. Tal situación no se cono-

ce a ciencia cierta en Colombia como zona tropical, pero podría ser contraria puesto que hay una variación de temperatura mayor en las aguas cálidas que en las frías.

El cálculo del ICOTEM se puede obtener aplicando la siguiente expresión matemática:

$$\text{ICOTEM} = -0,49 + 1,27 \text{ Log}(\text{Temperatura vertimiento} - \text{Temperatura curso receptor})$$

Si la diferencia en temperatura es menor a 275,7 K (2,5°C), entonces el valor de ICOTEM es cero. Si la diferencia en temperatura es mayor a 288 K (15°C), entonces el valor del ICOTEM es igual a uno.

El índice puede obtenerse en forma muy aproximada a partir de la Figura 2.

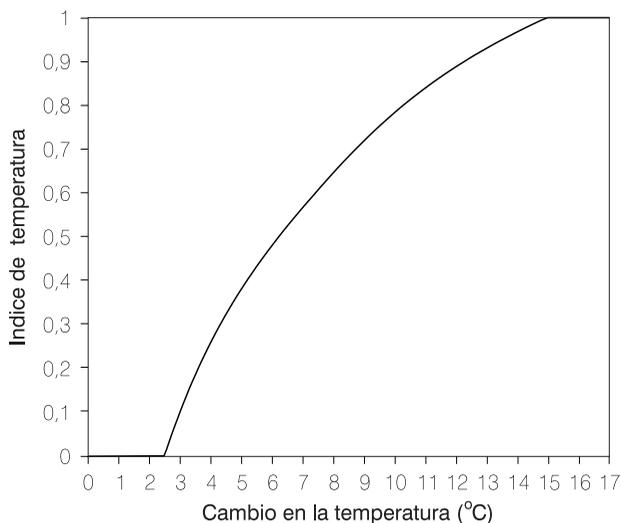


Figura 2. Índice de contaminación por cambio en la temperatura

Índices de contaminación por hidrocarburos

- Hidrocarburos aromáticos en peces y sedimentos (ICOARO):

$$\text{ICOARO} = -0,07 + 0,13 \text{ aromáticos}$$

Si aromáticos > 8 µg/g, ICOARO = 1

- Hidrocarburos alifáticos resueltos en peces y sedimentos (ICOALRE):

$$\text{ICOALRE} = 0,06(\text{alifáticos resueltos})^{0,60}$$

Si alifáticos resueltos > 100 µg/g, ICOALRE = 1

- Hidrocarburos alifáticos no resueltos en peces (ICOALNORE-P):

$$\text{ICOALNORE-P} = 0,08(\text{alifát. no resueltos})^{0,62}$$

Si alifáticos no resueltos > 60 µg/g,
ICOALNORE-P = 1

- Hidrocarburos alifáticos no resueltos en sedimentos (ICOALNORE-S):

$$\text{ICOALNORE-S} = 0,07(\text{alifát. no resueltos})^{0,61}$$

Si alifáticos no resueltos > 80 µg/g,
ICOALNORE-S = 1

- Hidrocarburos alifáticos totales en peces y sedimentos (ICOALTO):

$$\text{ICOALTO} = 0,05 (\text{alifáticos totales})^{0,58}$$

Si alifáticos totales > 175 µg/g, ICOALTO = 1

Los índices pueden obtenerse en forma muy aproximada a partir de la Figura 3.

Se sugiere la evaluación de hidrocarburos en peces para sistemas lóticos, y peces y sedimentos en sistemas lénticos. Los rangos que definen tales índices se presentan en la Tabla 5.

CONCLUSIONES

- La implementación de índices de contaminación, para la caracterización de aguas dulces, permite que personas que no se encuentren familiarizadas con los rangos naturales de cada variable fisicoquímica, puedan interpretar la condición de cualquier sistema, sea este lótico o léntico.
- Los ICO están diseñados para valorar problemas ambientales diferentes, no están correlacionados y son complementarios, por lo que una condición particular puede llevar a que, en un estudio, se implementen muy pocas variables relativas sólo al problema de contaminación en cuestión.
- Los índices ICOMI, ICOMO, ICOSUS, ICOTRO e ICOpH, permiten cuantificar el grado de contaminación de las aguas respecto a su condición general y no a contaminantes específicos. Conjugan las propiedades más fundamentales de las aguas, y por

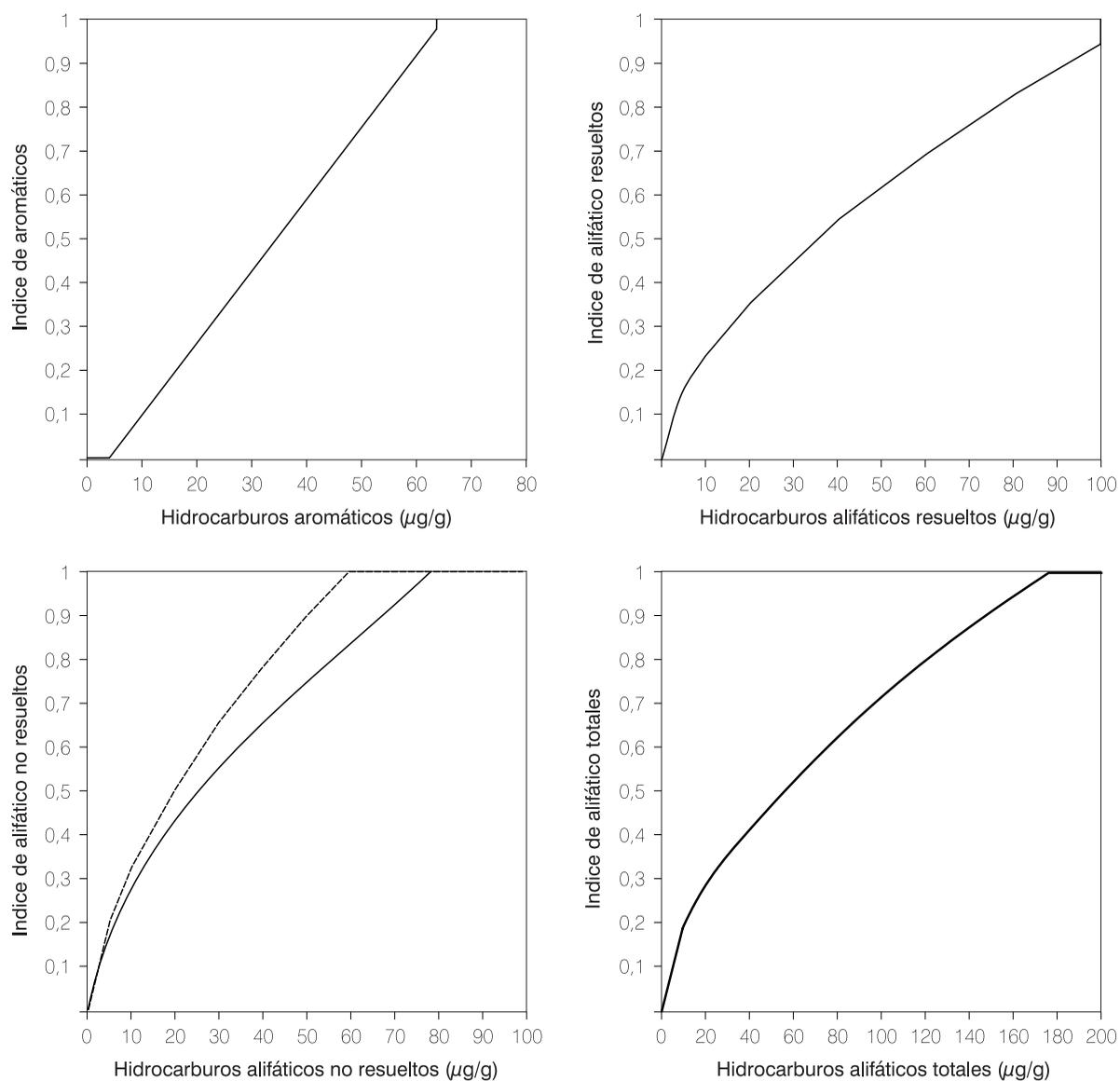


Figura 3. Índices de contaminación por hidrocarburos.

Tabla 5. Valores sugeridos de evaluación de hidrocarburos en peces para sistemas lóticos y, peces y sedimentos en lénticos.

ICO	Contaminación	Caracterización	Escala de Color
0 - 0,2	Ninguna	Aguas puras y quizá con aportes biogénicos	Azul
> 0,2 - 0,4	Baja	Con leve incidencia antrópica	Verde
> 0,4 - 0,6	Media	Notable actividad antrópica	Amarillo
> 0,6 - 0,8	Alta	Incidencia importante de la industria del petróleo	Naranja
> 0,8 - 1	Muy alta	Áreas muy contaminadas por hidrocarburos petrogénicos	Rojo

esto son variables que regularmente se determinan en cualquier estudio limnológico o ambiental, muy a pesar de que la mayoría de ellas no están siquiera contempladas en la legislación nacional, razón por la cual cobran especial interés.

- El ICOTEM, por otro lado, posibilita la evaluación del impacto generado por la temperatura en vertimientos, y toma como base la diferencia entre éste y el cuerpo receptor. En forma distinta a los anteriores, no otorga valores de condición, los cuales no podrían ser aplicados objetivamente a diferentes altitudes.
- Los índices de contaminación por hidrocarburos revelan, en gran medida, las dificultades hasta la fecha afrontadas en la interpretación de resultados, por la falta de parámetros de referencia en cuanto a hidrocarburos alifáticos y aromáticos en sedimentos y tejidos de peces. Permiten, entonces, una valoración certera de la incidencia de las actividades antrópicas y petroleras en componentes de los ecosistemas acuáticos con gran susceptibilidad a su acumulación.

REFERENCIAS

- 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.
- BP Exploration - Ecotest, 1998. *Monitoreo limnológico de los sistemas acuáticos en el área de influencia de los bloques Tauramena, Santiago de las Atalayas, Piedemonte y Recetor*, Santafé de Bogotá.
- Ecopetrol - ICP, 1999a. *Diagnóstico y caracterización de corrientes superficiales y suelos del km 26, poliducto Sebastopol - Medellín*, División de Tecnologías Complementarias, Coordinación de Asuntos Ambientales, Ecopetrol - ICP.
- Ecopetrol - ICP, 1999b. *Informe de resultados ecotoxicológicos de los vertimientos y cuerpos receptores del área de influencia de la Gerencia Llanos - GLL, Apiay*, muestreo 1998.
- Ecopetrol - ICP, 1999c. *Informe de resultados ecotoxicológicos del vertimiento y cuerpo receptor del área de influencia del Campo Toldado, Gerencia Alto Magdalena - GAM, Ortega*, muestreo 1998.
- Ecopetrol - ICP, 1999d. *Informe de resultados ecotoxicológicos del cuerpo receptor de los vertimientos del Campo Casabe, Gerencia Centro Oriente - GCO, Yondó*, muestreo 1998.
- 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", in: *Statistical aspects of water quality monitoring*, A.H. El-Shaarawi y R.E. Kwiatkowski (Eds.), p.: 273 - 291. Elsevier, Amsterdam.
- 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.
- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), 1982. "Determinación de los hidrocarburos del petróleo en los sedimentos", *Boletín Unesco*, No. 11.
- 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.
- Margalef, R, 1983. *Limnología*. Omega, Barcelona.
- Martínez de Bascarán, G, 1976. "El índice de calidad del agua", *Ing. Quím.*: 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*, Bogotá, Colombia.
- MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes), 1992. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*, España.
- Ocensa - Ecotest, 1997. *Monitoreo fisicoquímico y biológico de los cursos lóticos en el área de influencia del oleoducto Cusiana - Coveñas*, Santafé de Bogotá.
- Biología Aplicada, Ecology Ltda, Alberto Ramírez y Ecopetrol - ICP, 1993. *Oleoducto de Colombia. Estudio de línea base. Componentes biológicos y fisicoquímicos de los sistemas acuáticos*.
- Prat, N., González, G. y 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, Bogotá, 455 págs.

- Ramírez, A., 1999. *Ecología aplicada. Diseño y análisis estadístico*, Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santafé de Bogotá.
- Ramírez, A., Restrepo, R. y Viña, G., 1997. "Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación", *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1 (3):135 - 153.
- Ramírez, A. y Viña, G., 1998. *Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de Análisis*, BP Exploration - Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santafé de Bogotá.
- Rowland, S.J. and Robson, J.N., 1990. "The widespread occurrence of highly branched acyclic C₂₀, C₂₅ and C₃₀ hydrocarbons in recent sediments and biota - A review", *Mar. Env. Res.*, 30: 191 - 216.
- Simoneau, M., 1986. "Spatial variability in the water quality of Québec Rivers", in: *Statistical aspects of water quality monitoring*, A.H. El-Shaarawi and R.E. Kwiatkowski (Eds.), ps. 117 - 135. Elsevier, Amsterdam.
- Viña, G., Ramírez, A., Lamprea, L., Garzón, B., Schmidt-Mumm, U., Rondón y E., Flores, C., 1991. *Ecología de la ciénaga de Zapatoza y su relación con un derrame de petróleo*, ECOPETROL-DCC, Cúcuta.
- Welch, E.B., 1996. *Ecological effects of wastewater*, Chapman & Hall. London.