

ESTABLECIMIENTO DE ÍNDICES DE CALIDAD AMBIENTAL DE RÍOS CON BASES EN EL COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTO Y DE LA TEMPERATURA. APLICACIÓN AL CASO DEL RÍO MEDELLÍN, EN EL VALLE DE ABURRÁ EN COLOMBIA

ESTABLISHMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY INDICES OF RIVERS ACCORDING TO THE BEHAVIOR OF DISSOLVED OXYGEN AND TEMPERATURE. APPLIED TO THE MEDELLÍN RIVER, IN THE VALLEY OF ABURRA IN COLOMBIA

ENRIQUE POSADA

Máster en Ingeniería Mecánica, University Of Maine At Orono, USA, Director de proyectos INDISA S.A., Medellín Colombia, enrique.posada@indisa.com

DANIEL MOJICA

Ingeniero Mecánico, Auxiliar de Ingeniería INDISA S.A Medellín Colombia. Daniel.mojica@indisa.com

NATALIA PINO

Ingeniera Química, Ingeniera de proyectos INDISA S.A Medellín Colombia, natalia.pino@indisa.com

CARLOS BUSTAMANTE

Ingeniero Químico, Universidad de Antioquia, Iqbustamante@gmail.com

ANDRÉS MONZÓN PINEDA

Licenciado en Ingeniería de Recursos Ambientales, Humboldt State University, USA, amp123@humboldt.edu

Recibido para revisar Mayo 24 de 2013, aceptado Julio 31 de 2013, versión final Agosto 20 de 2013

RESUMEN: En este artículo se realiza un análisis del comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y de la temperatura (T) en el río Medellín, principal cuerpo de agua que forma el Valle de Aburrá en Colombia. Se establecen correlaciones entre estos dos parámetros y los comportamientos esperados para un cuerpo de agua no contaminado de acuerdo a las variables atmosféricas temperatura y presión. El análisis se hizo con base en los datos obtenidos en la Fase II del proyecto Red Rio desarrollado por un grupo de universidades para la autoridad ambiental local, con el fin de estudiar el comportamiento ambiental del río. Luego de un extenso análisis de los múltiples datos de OD y T tomados en 20 estaciones de muestreo, se presenta un índice de calidad ambiental de fácil elaboración, basado en las diferencias entre las curvas experimentales para OD y T sus comportamientos esperados para una corriente no contaminada. Los resultados muestran de forma clara y didáctica cómo es el comportamiento del río en su paso por las 20 estaciones muestreo. Se propone el empleo de este índice como una herramienta práctica para mantener un monitoreo continuo del comportamiento ambiental de este río o de cualquier otra corriente de agua.

PALABRAS CLAVE: Oxígeno disuelto, Saturación de oxígeno, Temperatura, Índices de calidad ambiental, Contaminación del agua.

ABSTRACT: This study presents an analysis of the dissolved oxygen (DO), temperature (T) and their behavior in the Medellín River, the more important body of water that forms the Aburrá Valley in Colombia. Some correlations are established between these two parameters and the expected behavior for a clean water body at a given atmospheric temperature and pressure. The analysis was based on data obtained in the Phase II of the "Red Río" project that was developed by a group of universities for the local environmental authority to study the river. After an extensive analysis of multiple OD and T data that was taken at 20 sampling stations, this review presents a water environmental quality index easy to calculate, based on the differences between the T and OD experimental curves and their expected behavior for an uncontaminated stream. The results show, in a very clear and didactic way, how the river behaves across the 20 sampling stations. We propose the use of this index as a practical tool to maintain a continuous monitoring of the environmental performance of this river or other watercourses.

KEYWORDS: Dissolved oxygen, saturated oxygen, Temperature, Water environmental quality indexes, Water pollution.

1. INTRODUCCIÓN

El Río Medellín es el principal cuerpo de agua del Valle de Aburrá, región geográfica del departamento de Antioquia, Colombia. El río está sometido al impacto contaminante de una población de algo más de tres millones de habitantes que viven en la ciudad de Medellín y en los municipios cercanos. Aunque la

zona cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, ésta trata menos de la tercera parte de las mismas, estando en la actualidad en desarrollo el proyecto para tratar la mayor parte de las aguas restantes. En cuanto a las fuentes industriales el avance en el tratamiento y en la legislación aplicable ha sido gradual.

Tabla 1. Estaciones de Monitoreo

CÓDIGO	ESTACIONES	DISTANCIA (km)	ALTITUD (msnm)	PRESIÓN mm Hg
E1	San Miguel	2	1863	614,7
E2	Primavera	12	1802	619,0
E3	Ancón Sur	22	1643	630,3
E4	Quebrada Doña María	25	1550	637,0
E5	Antes de San Fernando	27	1513	639,7
E6	Después de San Fernando	27,1	1509	640,0
E7	Puente Guayaquil	30	1476	642,4
E8	Aula Ambiental	36	1463	643,4
E9	Puente Acevedo	41	1449	644,3
E10	Quebrada La García	46	1440	645,0
E11	Puente Machado	50	1431	645,7
E12	Ancón Norte	55	1412	647,1
E13	Puente Girardota	58	1368	650,3
E14	Parque de Las Aguas	64	1355	651,3
E15	Hatillo	70	1350	651,6
E16	Papelsa	76	1319	654,0
E17	Popalito	83	1270	657,6
E18	Pradera	89	1192	663,5
E19	EADE	94	1146	667,0
E20	Puente Gabino	100	1098	670,6

El río ha sido estudiado en diversas campañas de muestreo y de caracterización. Se cuenta con una red de investigación y de estudios denominada Red Río, en la cual participan tanto la autoridad ambiental (Área Metropolitana) como diversas instituciones educativas y de investigación: Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad de Medellín y Universidad Nacional. Una campaña relativamente reciente de monitoreo (2006, 2007) estudió la Cuenca Hidrográfica del río Medellín, en jurisdicción del Área Metropolitana. Se tomaron datos experimentales, medidos en diferentes puntos estratégicos del Río Medellín, comprendidos entre su nacimiento (Alto de San Miguel), hasta

cuando el río cambia de nombre a Río Porce, después de la desembocadura del Río Grande (estación Puente Gabino). Las mediciones realizadas abarcan diferentes variables tales como Oxígeno disuelto (OD), temperatura del agua (T), temperatura del aire en la zona (TA), conductividad, nitrógeno, metales, y presencia de microorganismos, entre otras.

En la tabla 1. se presenta la lista de las estaciones de monitoreo con sus situaciones, altitudes y presiones atmosféricas medias. En las estaciones E4 y E10 se tomaron las muestras en dos de las quebradas mayores que desembocan en el río, algunos metros antes de su desembocadura al mismo.

2. PRINCIPIOS BÁSICOS

Para una mejor comprensión del trabajo desarrollado en este artículo, se presentan algunas definiciones y conceptos básicos.

Oxígeno disuelto (OD) y su equilibrio

El OD es uno de los principales indicadores de contaminación de aguas. Los bajos niveles de OD son principalmente causados por la presencia de materia orgánica o de material inorgánico parcialmente oxidado. En ambos casos, se presenta una demanda de oxígeno, ya sea para la respiración de los organismos capaces de digerir la materia orgánica o por la oxidación de los compuestos inorgánicos. Tal demanda puede agotar o disminuir apreciablemente el OD.

El OD en las aguas limpias, no sujetas a demandas de OD, tiene concentraciones de equilibrio que dependen de la presión atmosférica y de la temperatura del agua.

Para el caso que nos ocupa, se asumirá que el OD de equilibrio o saturación para aguas limpias se define mediante la ley de Henry, que establece el equilibrio entre la presión parcial de oxígeno en la atmósfera y la presión del oxígeno en el agua. Esta ley indica el máximo de OD que se puede presentar en el agua sin intervención mecánica. Este equilibrio se cuantifica según la ecuación 1.

$$H_e = \frac{p}{c} \quad [\text{eq 1}]$$

Donde:

H_e = constante de Henry

p = presión parcial del oxígeno en el aire

c = concentración del oxígeno en el agua

La presión y la temperatura tienen un efecto sobre el OD. La ley de Henry expresa que la solubilidad de un gas en un fluido es: directamente proporcional a la presión parcial e inversamente a la temperatura. De acuerdo a esto si la presión aumenta, la cantidad de aire que puede ser mantenido en solución a una temperatura dada aumenta proporcionalmente.

La constante de Henry depende de la temperatura del agua. La presión parcial del oxígeno en el aire depende de la presión atmosférica, es decir, de la altura sobre el nivel del mar. Las curvas mostradas en la Figura 1 representan curvas de equilibrio de OD a diversas temperaturas y presiones.

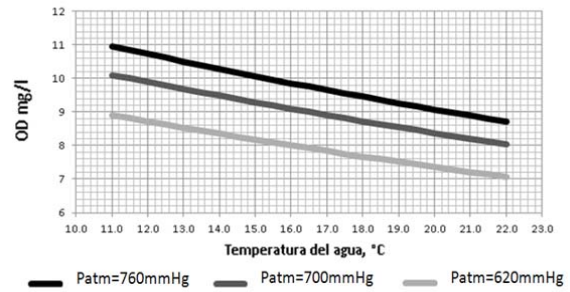


Figura 1. Influencia de la temperatura y la presión en el OD bajo equilibrio ideal (saturación).

Para el caso de aguas contaminadas con sustancias demandantes de oxígeno, es de esperar que las concentraciones de OD vayan disminuyendo con el nivel de contaminación, en comparación con los niveles de saturación establecidos por la ley de Henry. Por lo tanto si se hace un estudio del comportamiento del OD en una zona de un río cuya altura sobre el nivel del mar se conozca, se puede establecer un comportamiento medio estadístico representativo del OD contra la temperatura y comparar ese comportamiento con la curva de equilibrio. Las diferencias entre ambas curvas permiten obtener un índice representativo de la calidad del agua.

Temperatura del agua (T) y su equilibrio

Existe abundante evidencia de que la temperatura de una corriente de agua, bajo condiciones de equilibrio, está relacionada con la temperatura del aire ambiente en una forma propia para cada corriente considerada, con un comportamiento que se ajusta a una línea de tendencia que en algunos casos puede ser lineal y en otros tiene un comportamiento un poco más complejo.

Entre los diversos estudios, cabe citar la investigación realizada por V. Kothandaraman y R. L. Evans [3] sobre la relación de temperatura aire- agua para predecir el comportamiento de la temperatura del Río Illinois, en la que se encuentra que los valores calculados en el modelo de predicción sigue el mismo patrón de los valores reales medidos en el río.

Para el caso de aguas contaminadas con descargas calientes, es de esperar que las temperaturas de la corriente se alejen de las curvas de influencia de la temperatura del aire ambiente, siendo tal distanciamiento relacionado con los niveles de contaminación térmica. Por lo tanto si se hace un estudio del

comportamiento de las curvas de temperatura en una zona de un río en la cual se conozca su dependencia esperada con las temperaturas del aire, y se compara con la tendencia real (obtenida mediante un comportamiento medio estadístico representativo), las diferencias entre las curvas permiten obtener un índice de contaminación térmica representativo de la calidad del agua.

3. METODOLOGÍA

Bases de datos

Se han utilizado los datos de OD, T y TA reportados por la referencia [1], durante la campaña de medición ya mencionada. Como se trata de una base de datos publicada en formato de PDF se hizo un procesamiento de los datos para llevarlos a una hoja de cálculos, los cuales se verificaron para evitar errores de transcripción o de reporte que dieran lugar a comportamientos anómalos estadísticamente.

Para el análisis de la información se evaluaron cerca de 12.500 datos y se calcularon los estadígrafos representativos de los datos, entre los cuales se incluyen: media aritmética como medida de tendencia central y como estadígrafo de dispersión, la desviación estándar. También se determinaron los valores mínimos, máximos y rangos.

Con fines de visualizar los datos en su conjunto y por estación, se realizaron diagramas de dispersión para cada una de las estaciones con sus respectivas **líneas de tendencias**, para así compararlas con las curvas de referencia y cuantificar su diferencia.

Curvas de referencia y de datos

Para el análisis del comportamiento del OD con relación a la temperatura, se calcula el oxígeno de saturación para las condiciones de la zona por medio de la ley de Henry y se grafica como curva de referencia para cada estación.

Como ejemplo, en la Figura 2 se muestran los dos tipos de curvas para el OD (lado izquierdo) y T (lado derecho) para tres de las estaciones E1 (San Miguel), E11 (Machado) y E20 (Gabino). Las curvas de referencia de OD, es decir, las líneas de saturación, se visualizan como las líneas situadas por encima de

los datos experimentales. Se muestran las líneas de tendencia de los datos reales.

Se utilizó como curva de referencia la línea de tendencia de la estación inicial (E1 San Miguel) para el análisis de la influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura del agua del río, ya que en esta zona no presenta descargas industriales y hay una baja influencia por parte de la población.

En lo que respecta al comportamiento de las temperaturas del agua y del aire en la Figura 2, todos los casos presentan las curvas de ajuste y la curva de referencia, Tal como se ha indicado, en cuanto a la dispersión en los datos, la estación San Miguel E1, es la de menor, mientras que la estación E11 es la de mayor dispersión y con significativos alejamientos de la curva de referencia utilizada, basada en la estación E1 de aguas con poca intervención.

A partir de las líneas de tendencia de cada estación es posible cuantificar la diferencia con su respectiva curva de referencia, tanto para el caso del OD como para la T. Es evidente que mientras mayores sean estas diferencias, mayor es el grado de contaminación de la corriente de agua.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El río Medellín tiene datos de OD y temperatura altamente dispersos, debido a la influencia de un gran número de variables internas y externas, tales como las condiciones atmosféricas, las diferentes descargas tanto naturales como industriales y residenciales, y los accidentes geológicos del cauce como las rocas y cascadas que pueden oxigenar mecánicamente el medio. Una alta dispersión es natural y esperada, Sin embargo, como se ha discutido, los mayores niveles de dispersión de los datos experimentales tienen que ver con mayores niveles de contaminación.

En el caso del OD, en la figura 2, se observa en la que en la estación E1 los datos experimentales tienen menores dispersiones y se acercan más a la curva de saturación, clara indicación de que se trata de una zona limpia. En cambio en la estaciones E11 hay alta dispersión de los datos y los ajustes se alejan de las curvas de saturación, señal evidente de alta contaminación. En la estación final E20, se tiene menor dispersión y un mayor acercamiento del ajuste de los datos a la curva de equilibrio, lo cual indica una clara recuperación de la calidad del agua.

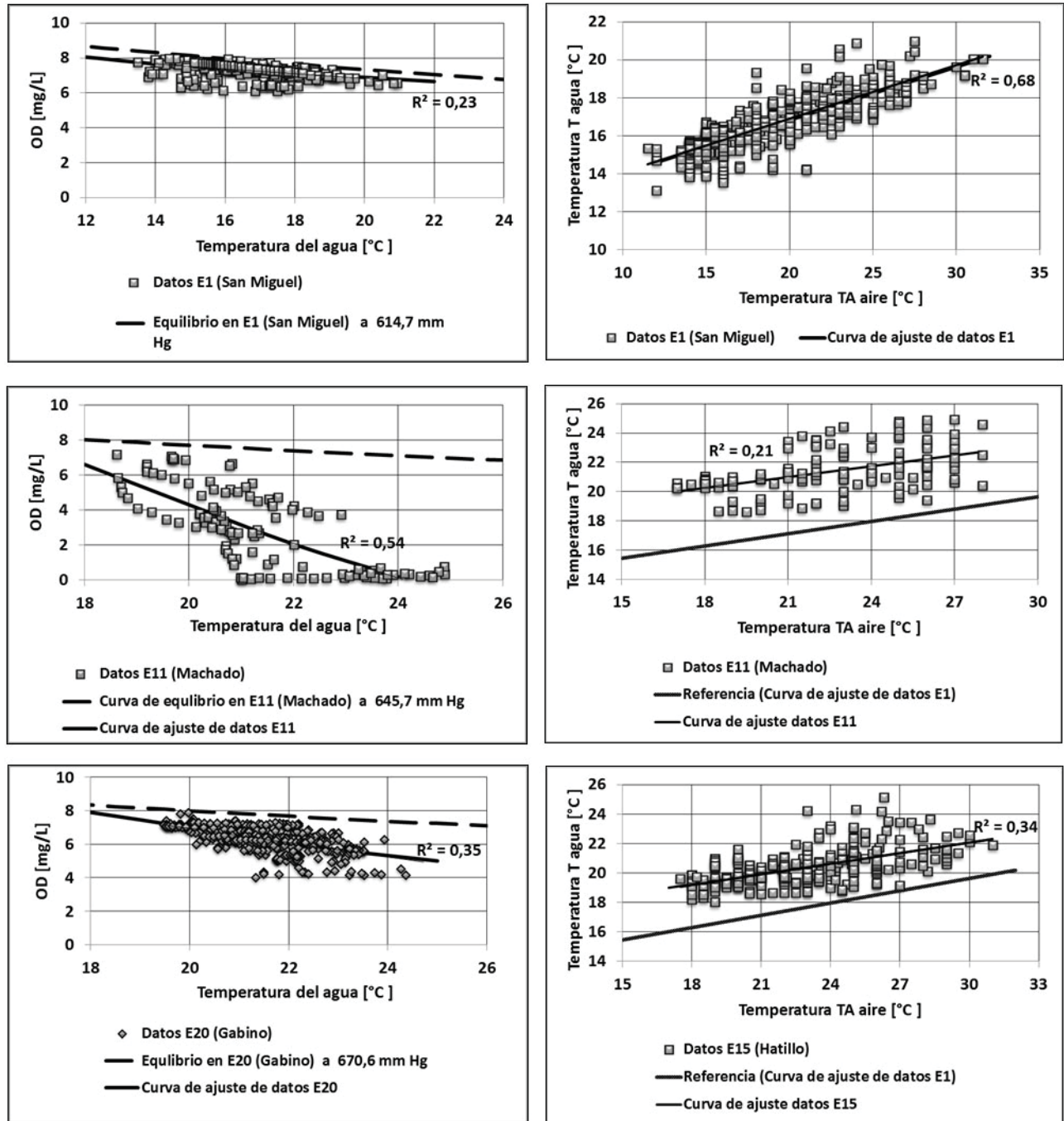


Figura 2. OD contra T (datos experimentales, curvas de ajuste y de saturación de oxígeno) en paralelo con T contra TA (datos experimentales, curvas de ajuste y de referencia) para tres de las estaciones estudiadas.

La Figura 3, muestra un panorama global del OD de todos los datos experimentales para todas las estaciones del río como función de la temperatura. Se incluyen en ella 2 curvas de saturación de referencia, de la estación inicial (E1, San Miguel), y de la estación final (E20, Gabino). Es evidente que el OD está, para la gran mayoría

de los datos, por debajo de la línea de referencia de la estación E1, que es la que presenta un menor potencial de dilución de oxígeno de las estaciones evaluadas por ser la de menor presión atmosférica, esto se debe a que en estos lugares el agua se encuentra más contaminada y a temperaturas mayores.

La Figura 4, muestra la totalidad de las parejas de datos de temperatura de aire y de la corriente de agua para todas las estaciones. Se aprecia que los datos se agrupan con tendencia creciente por encima de la curva de referencia para la estación E1. A medida que las estaciones se alejan de la estación inicial, los datos se desplazan verticalmente. Es evidente que esto tiene que ver con la entrada al río de distintas descargas y vertimientos y los efectos de las digestiones de materiales oxidables en su paso por el río. Por ello, este comportamiento se puede considerar como resultante de cargas térmicas causadas por la actividad humana.

Para visualizar en forma más clara y comparativa el comportamiento de las variables estudiadas en cada estación, se decidió encontrar los promedios

de los datos en intervalos de temperaturas de 0.5°C con sus valores máximos y mínimos para graficarlos y analizarlos. La Figura 5, ilustra el promedio de separación entre las curvas de referencia y la línea de tendencia de la dispersión experimental de OD, junto con los valores máximos y mínimos para cada estación.

Un mayor rango entre máximos y mínimos, indica un comportamiento experimental más disperso y más alejado de las curvas de saturación respectivas para cada estación (lo cual incluye comportamientos no paralelos a las curvas de referencia).

De acuerdo con lo anterior, se observa que el deterioro del río presenta un comportamiento creciente hasta la estación E15, en donde comienza a recuperarse.

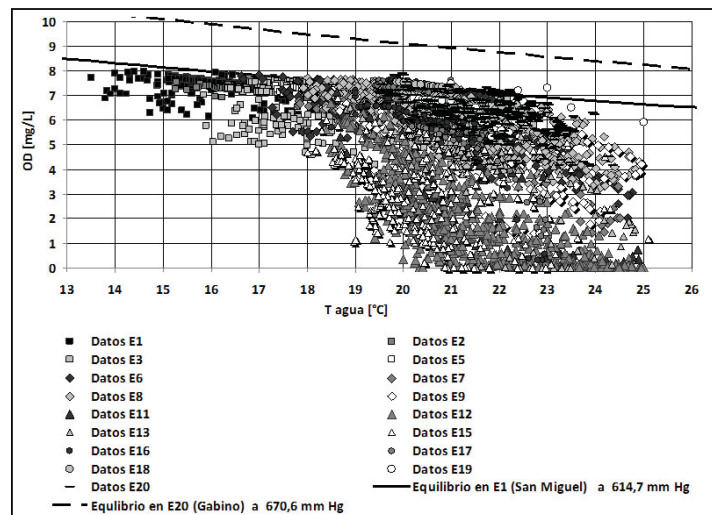


Figura 3. Datos experimentales de OD contra para todas las estaciones estudiadas

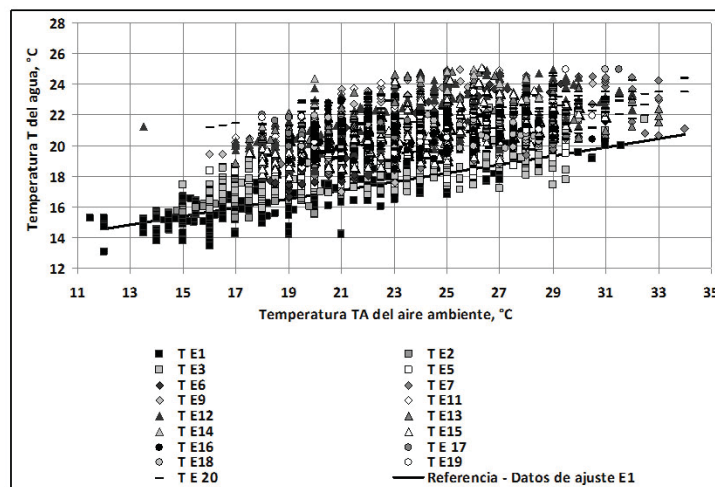


Figura 4. Dispersión de la relación de temperatura Aire-agua a lo largo del Río Medellín.

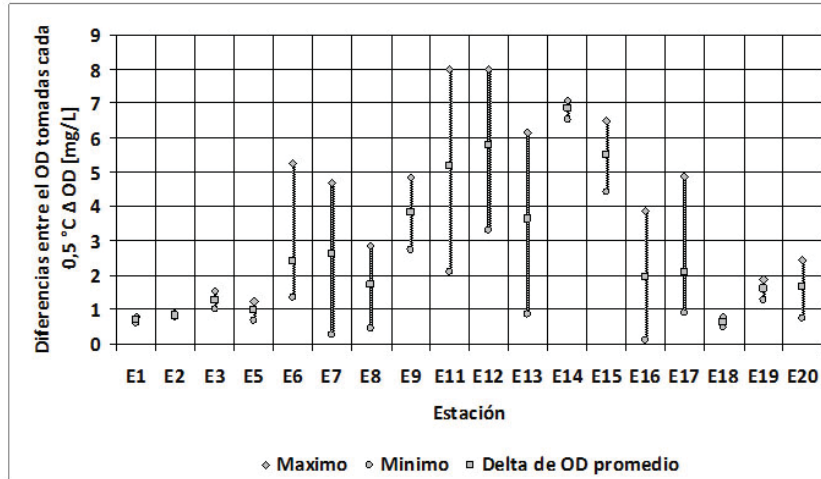


Figura 5. Diferencias estadísticas entre la curva de referencia y la línea de tendencia del OD para cada estación.

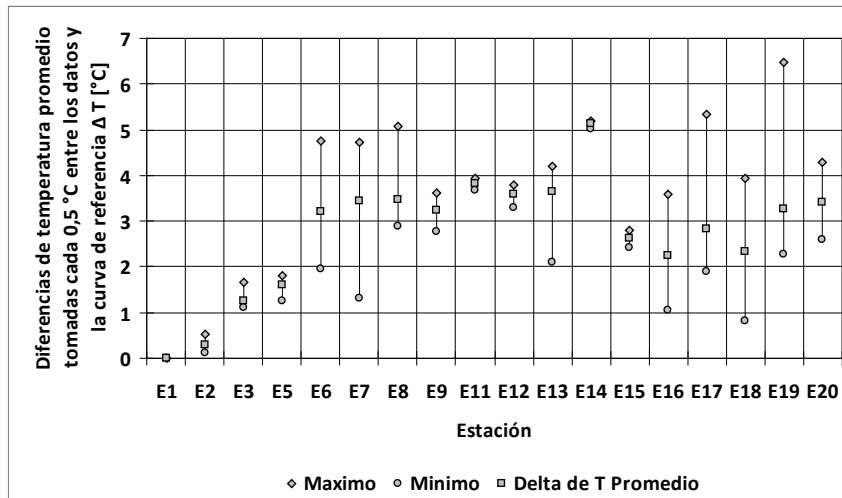


Figura 6. Diferencias estadísticas entre la curva de referencia y la línea de tendencia de T-TA para cada estación

La Figura 6 muestra un análisis similar para las líneas de tendencia de las relaciones del las T y TA al compararlas con la curva de referencia, que en todos los casos ha sido el ajuste de datos de la estación E1. De ella se obtienen conclusiones semejantes a las derivadas de la Figura 5 para el OD.

5. INDICADOR DE CALIDAD AMBIENTAL BASADO EN EL OD Y EN LA T (ICOT)

Con base a las observaciones realizadas, se plantea un indicador para cualificar el estado de un río en términos de sus desviaciones en el OD y en la T con respecto a condiciones de equilibrio y a corrientes no contaminadas en ríos con condiciones similares al evaluado, ríos de planicie con poca oxigenación

mecánica debida a los accidentes geográficos.

Los indicadores de calidad de Oxígeno (ICOD), de Temperatura (ICT) del agua y combinado OD-T (ICOT), cuantifica las diferencias entre el comportamiento del OD y la T presentes en un río y los comportamientos esperados para un río en buenas condiciones. Se ha escogido el índice de tal manera que a mayor valor de los índices, mejor la calidad y menos contaminación del río. Los índices se han calculado siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$ICO = (1 - \text{Delta medio de OD} / 8) * 10 \quad [\text{eq 2}]$$

$$ICT = (1 - \text{Delta medio de T} / 10) * 10 \quad [\text{eq 3}]$$

$$ICOT = ICO * 0.70 + ICT * 0.30 \quad [eq\ 4]$$

Se advierten en general índices de calidad ICOT bajos. Se

presentan niveles aceptables en las estaciones de la parte inicial del río. Se evidencia una tendencia a la recuperación a partir de la estación E16.

Tabla 3. Resultados obtenidos al aplicar los índices de calidad y calificaciones asignadas

Estación	ICO	Calidad	ICT	Calidad	ICODT	Calidad
E1	9,1	buena	10,0	buena	9,4	buena
E2	9,0	aceptable	9,7	buena	9,2	buena
E3	8,4	aceptable	8,8	aceptable	8,5	aceptable
E5	8,8	aceptable	8,4	aceptable	8,7	aceptable
E6	7,0	pobre	6,8	pobre	6,9	pobre
E7	6,7	pobre	6,6	pobre	6,7	pobre
E8	7,8	pobre	6,5	pobre	7,5	pobre
E9	5,2	mala	6,8	pobre	5,7	mala
E11	3,5	crítica	6,2	pobre	4,3	mala
E12	2,8	crítica	6,4	pobre	3,9	crítica
E13	5,4	mala	6,3	pobre	5,7	mala
E14	1,4	crítica	4,9	mala	2,5	crítica
E15	3,1	crítica	7,4	pobre	4,4	mala
E16	7,6	pobre	7,7	pobre	7,6	pobre
E17	7,4	pobre	7,2	pobre	7,3	pobre
E18	Tiene pocos datos		7,7	pobre		
E19	8,0	pobre	6,7	pobre	7,6	pobre
E20	8,0	pobre	6,6	pobre	7,5	pobre

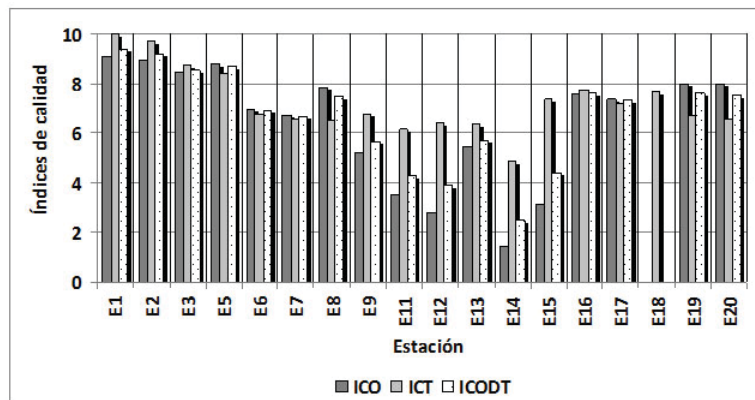


Figura 7. Perfil de índices de calidad del Río Medellín en las estaciones de monitoreo.

6. CONCLUSIONES

Los métodos convencionales para monitorear la calidad de las aguas de un río, tienden a ser complejos y costosos, y de cierta manera lejanos a las poblaciones afectadas, por las altas inversiones necesarias en laboratorio y equipos, y por el nivel de entrenamiento de las personas que hacen los monitoreos. Los índices

que acá se proponen se pueden calcular con facilidad con base en mediciones simples de OD y T, para las cuales hay equipos portátiles de costo razonable. Esto puede contribuir a empoderar a las comunidades y usuarios, y a crear mayor conciencia colectiva, además de permitir entender la forma en que el río se comporta y evaluar la efectividad de las acciones que se vayan desarrollando.

Si bien son muchas las variables a considerar, es conveniente contar con métodos sencillos como el que acá se propone, que se basa en la utilización de índices de calidad fáciles de medir, de visualizar y de comunicar a la ciudadanía.

Es importante que se haga un uso intenso de los datos que se obtienen en los estudios que se hagan por parte de universidades e instituciones y que estén disponibles para la comunidad, como son los de la investigación que sirvió de base a este trabajo. Son muchos los análisis y los estudios que se pueden hacer con base en la gran riqueza de información disponible.

Es evidente que el Río Medellín se encuentra en condiciones de muy baja calidad, lo que exige a la comunidad tener un mayor control sobre las descargas realizadas sobre él. Se espera que la “Planta de Tratamiento de aguas Residuales Bello”, que entrará en operación en el 2015, cumpla el objetivo de tratar el 75% de las aguas residuales del valle de Aburrá, y le permita al río recuperar sus antiguas glorias. Esto será apenas un paso que debe ser complementado con muchas otras acciones.

REFERENCIAS

- [1] Diseño y puesta en marcha de la Red de Monitoreo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín en Jurisdicción del Área Metropolitana-Fase II, AMVA et al, 2007.
- [2] Chapra Steven C.- Surface water quality modeling, Estados Unidos: McGraw Hill, 1997
- [3] V. Kothandaraman, R. L. Evans-Use of Air-Water Relationships for Predicting Water Temperature. – Reporte de investigación- Department of Registration and education, state of Illinois. [Consultado el 14 de abril del 2013], Disponible en: <<http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/RI/ISWSRI-69.pdf>>
- [4] Morrill, J. C. and Bales, R. C., Conklin, M. H. - The Relationship Between Air Temperature and Stream Temperature, American Geophysical Union, Spring Meeting 2001, abstract #H42A-09
- [5] Cho, H. and Lee, K., (2012). Development of an Air-Water Temperature Relationship Model to Predict Climate-Induced Future Water Temperature in Estuaries. J. Environ. Eng., 138(5), pp. 570-577, 2012.
- [6] Kit Rutherford., Ian Jowett. –Procedure for calculating water Temperature.-NIWA, Hamilton. [Consultado el 14 de abril del 2013], Disponible en: <<http://www.niwa.co.nz/sites/default/files/import/attachments/temperature.pdf>>
- [7] Colin Neal, Martin Harrow, Richard, J., Williams-Dissolved carbon dioxide and oxygen in the River Thames: Spring–summer 1997- Science of The Total Environment, Vol. 210–211(24) March, pp. 205-217, 1998.
- [8] Ramírez, A. and Viña, G.,-Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Bogotá: BP-Exploration, Universidad Jorge Tadeo Lozano; Cap 4, 1998.
- [9] UNIVERSIDAD DE PAMPLONA,- Calidad del agua – Valoración y monitoreo, [Consultado el 11 de Abril del 2013] Disponible en: <http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo1.pdf>
- [10] González, J. D.,- Un índice de calidad de agua basado en lógica difusa, aplicado a la cuenca hidrográfica del río Aburrá, en la jurisdicción del área metropolitana. Medellín, Revista Dyna Nro. 171, pp. 50-58, Febrero 2012.