

Tech note: Determination of water quality index (WQI) of Morón river and Patanemo river of Carabobo state in Venezuela

Tony M. Espinosa Paz^{*,a}, Carmen Rodríguez^b

^aUnidad de Investigación de Ingeniería de Procesos. Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo

^bDepartamento de Biología. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad de Carabobo

Abstract.-

This research shows the determination of a Water Quality Index (WQI) for Patanemo and Moron rivers in Carabobo state. This index intent to classify the water quality in a scale from 0 to 100 according to the evaluate constituent and this allow to classify the water according to its state. The WQI developed considers thirteen constituents. The WQI is representative of water quality on a specific area where you got the sample and the moment when you get it and The studies conclude that the Morón river has “medium” quality, very close to “bad” in the two sectors studied (upstream and mouth) while the Patanemo river has a “good” quality almost “excellent” quality in the stretch upstream, while demotion but even “good” in the mouth. It is expected to be developed WQI can be used in the future as a tool to inform the public water quality in these and other rivers in Venezuela.

Keywords: water quality index (WQI); Patanemo river; Moron river

Nota técnica: Determinación del índice de calidad del agua (ICA), de los ríos Morón y Patanemo del Estado Carabobo, en Venezuela

Resumen.-

La presente investigación muestra la determinación de un Índice de Calidad de Agua (ICA) para los ríos Morón y Patanemo en el Estado Carabobo. Dicho índice propone clasificar en una escala de 0 a 100 la calidad representativa del agua, según los constituyentes evaluados; y esto, a su vez, posibilita la calificación del agua conforme a su estado. El ICA desarrollado considera trece constituyentes. El ICA obtenido representa un valor puntual, por lo que es característico de la calidad del agua del lugar y en el momento específico donde se tomaron las muestras y con el mismo se concluyó que: el río Morón presenta calidad “media” muy cercana de “mala” en los dos sectores estudiados (aguas arriba y desembocadura) mientras que el río Patanemo presenta una calidad “buena” casi excelente en el tramo aguas arriba, mientras que desmejora pero aun de calidad “buena” en la desembocadura. Se espera que este ICA desarrollado se pueda utilizar en el futuro como herramienta para informar al público la calidad del agua en estos y otros ríos de Venezuela.

Palabras clave: índice de calidad del agua (ICA); río Patanemo; río Morón

Recibido: mayo 2016

Aceptado: julio 2016

1. Introducción

Hay diversos factores que pueden afectar la calidad del agua como, por ejemplo, la geología del área, el ecosistema y actividades humanas tales como: las descargas del alcantarillado sanitario, la contaminación industrial, el uso de cuerpos de agua para recreación y el uso excesivo de los

* Autor para correspondencia

Correo-e: tony_paz@hotmail.com (Tony M. Espinosa Paz)

recursos de agua.

Existe una necesidad de evaluar los datos de calidad de agua en Venezuela y en el mundo entero de tal forma que sea un proceso científico válido y, a la vez, un producto útil y fácil de entender. Índice necesario tanto para aquellas personas encargadas del manejo de los recursos de agua como para el público en general con conocimiento técnico limitado.

Esta necesidad de un Índice de Calidad de Agua (ICA) está presente desde hace más de cuatro décadas, como lo plantea Brown et al [1].

La presente investigación muestra la determinación de un Índice de Calidad de Agua (ICA) para los ríos Morón y Patanemo en el Estado Carabobo.

El Índice de Calidad de Agua (ICA), es un tipo de índice ambiental que puede ser usado como este marco de referencia único para comunicar información sobre la calidad del ambiente afectado y para evaluar la vulnerabilidad o la susceptibilidad del agua a la contaminación [2]. Dicho índice propone clasificar en una escala de 0 a 100 la calidad representativa del agua, según los constituyentes evaluados; y esto, a su vez, posibilita la calificación del agua conforme a su estado como: Excelente, Bueno, Medio, Malo o Muy Malo. El ICA desarrollado considera trece constituyentes: oxígeno disuelto, pH, diferencia de temperatura, materia orgánica, metales, sólidos disueltos, turbidez, NO_3 , PO_4 , conductividad, alcalinidad, dureza y coliformes, los cuales fueron determinados mediante la evaluación de un grupo de expertos en la calidad de agua.

Han surgido diversos ICA Landwehr y Deininger los comparan en su trabajo [3], de esta comparación así como de otros similares en la literatura existente serán determinados los parámetros e indicadores del ICA a desarrollar. La aplicación a ríos está en la investigación de Tyson y House [4].

El ICA desarrollado representa un valor puntual, por lo que es característico de la calidad del agua del lugar y en el momento específico donde se tomaron las muestras y con el mismo se concluyó que el río Morón presenta una calidad “media” muy cercana de mala en los dos sectores estudiados (aguas arriba y desembocadura) mientras

que el río Patanemo presenta una calidad “buena” casi excelente en el tramo aguas arriba, mientras que desmejora pero aun de calidad “buena” en la desembocadura.

Se espera que este ICA desarrollado se pueda utilizar en el futuro como herramienta para informar al público la calidad del agua en estos y otros ríos de Venezuela.

2. Índice de calidad de agua

El Índice de la Calidad del Agua (ICA) de la National Sanitation Foundation (NSF) fue concebido en base a las características de los ríos norteamericanos [5]. Es necesario un índice que esté conforme a la problemática propia de los ríos Venezolanos.

Muchos índices de estado tropical para lagos han sido desarrollado los cuales incorporan a los lagos en una escala del 0 al 100. Los índices de calidad pueden ser calculados por muchos parámetros [6]. Por esta razón, este proyecto presenta un índice de calidad de aguas para los ríos de Venezuela.

Para los ríos se requieren herramientas de medición y vigilancia el estado ecológico de los ecosistemas acuáticos. Varios índices están en uso en España, aunque ha habido poco la comparación entre ellos. Benejam *et al* [7] muestran del conjunto de peces y característica limnológicas de las corrientes para evaluar la utilidad de varias métricas de pescado y comparar la calidad del hábitat y los índices bióticos actualmente en uso.

3. Antecedentes

En el caso de los estudios de los índices de calidad de agua para países latinoamericanos destacan los trabajos siguientes.

El trabajo de Zabala *et al* [8] que estudia los ríos cercanos a las plantaciones de cítricos en México. Villanueva y Esquivel [9] analizan como la actividad humana ha afectado ríos del Perú. Srebotnjak *et al* [9] verifican la problemática de un ICA global. Rimet [10] presenta una revisión de las vistas recientes sobre la contaminación del río y las diatomeas. Mas recientemente Lobo *et al* [11]

desarrolla un índice de calidad tropical para ríos de Brasil.

4. Metodología

La captación de las muestras de agua se realizó siguiendo la norma COVENIN 2709-02, la cual indica que según el tipo de muestra recolectada se realiza una captación de muestra integrada, captada en perfil vertical; con respecto a la modalidad de captación es del tipo captación manual; el tipo de muestreo toma en cuenta la recomendación de la norma para muestreo en Aguas Naturales en los aspectos de ríos y cursos de aguas, a fin de obtener muestras representativas y donde se recomienda conocer los caudales de los cauces seleccionados y también sobre estuarios, aguas costeras, mares y océanos, por tratarse de muestras que provienen de descargas o desembocaduras al mar.

En cuanto a la captación y preservación de las muestras se realizó bajo el protocolo de la misma norma, es decir, fueron preservadas en frío, y en el caso particular de las muestras para el análisis de mercurio se les añadió 1 ml de ácido nítrico (HNO_3) y para nutrientes "N" 1 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Se tomaron dos réplicas en cada punto de muestreo. Las muestras fueron enviadas a los laboratorios para los análisis correspondientes. En cuanto al volumen de las muestras se captaron volúmenes iguales de un (1) litro en cada réplica, lo excedía las necesidades mínimas requeridas.

La identificación de las muestras se hizo de la siguiente forma, muestra 1: muestra tomada a 150 m de la desembocadura del río (aguas arriba) y muestra 2: a la muestra tomada justo en la desembocadura del río en el mar.

La calidad de los datos se aseguró a partir de tres réplicas de una misma muestra. La recuperación se calculó a través del agregado de sales inorgánicas de Al, Cu, Cd, Ni, Cr, Pb y Zn, a tres réplicas de una muestra de concentración conocida y todas las muestras se analizaron por duplicado.

El periodo en que se tomaron las muestras fue en del 18 al 20 de febrero de 2012 en el río Patanémó y del 21 al 23 de febrero de 2012 en el río Morón.

Tabla 1: Límites de detección de los metales

Metal	Límite de Detección del metal (ppm)
Hg	0.005
Al	0.03
Zn	0.02
Pb	0.04
Cd	0.02
Cu	0.08
Ni	0.10
Cr	0.08

Los metales en agua, se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica con llama, utilizando un espectrofotómetro Perkin Elmer. Modelo 3100, a la longitud de onda recomendada para cada metal y las muestras de agua de río se analizaron directamente sin preparación previa. Los límites de detección de los metales del espectrofotómetro están dados en la Tabla 1.

Tabla 2: Límites de detección de los nutrientes y otros datos analizados

Nutrientes y Otros	Límite de Detección (mg/L o mg/Kg)
NO ₃	0,005
NO ₂	0,005
NH ₄	0,005
PO ₄	0,005
Materia Orgánica	(0,01) o (0,01 %)
Sólidos Disueltos	0,005
CO ₂	0,005
SO ₄	0,005

Con respecto a los nutrientes, se tiene lo siguiente: Los nitratos y amonio fueron analizados siguiendo la Norma COVENIN 2193-84. La materia orgánica total fue analizada siguiendo la Norma COVENIN 3008-93. Los sólidos disueltos fueron analizados siguiendo la Norma COVENIN 2461-87. La alcalinidad fue analizada siguiendo la Norma COVENIN 2188-84. La dureza fue analizada siguiendo la Norma COVENIN 2771-91. La determinación de CO₂ se efectúa por valoración neutralizando el ácido carbónico que se encuentra en equilibrio con el

CO₂ libre, mediante una solución de carbonato de sodio 0.05 N. Los nitritos y fosfatos fueron analizados siguiendo el: Standard Methods for examination of water and wastewater. Los límites de detección de los nutrientes están dados en la Tabla 2.

5. Resultados

Los resultados fueron tabulados en función a la concentración de los constituyentes evaluados versus el lugar de la toma de la muestra para cada río evaluado. Estos resultados están en las Tablas 3, 4 y 5.

Los resultados que reportan la Tabla 3 muestran que los únicos metales encontrados son níquel, plomo y aluminio.

En la Tabla 5, los coliformes fueron estimados de datos existentes no oficiales.

6. Análisis de los resultados

La vida de un río desde su manantial hasta la desembocadura en el mar, es un sistema altamente complejo con un sinnúmero de fenómenos, factores y dependencias. Además los sistemas fluviales dependen fuertemente de las condiciones climáticas (precipitación, escorrentía y temperatura). Los ríos siempre están en cambios por factores estacionales, relacionados con el clima del área biogeográfica donde se encuentran, también a cambios del mediano y largo plazo.

Los ríos constituyen sistemas abiertos y básicamente heterotróficos. El material que procede de las orillas del río, es el aporte más importante de energía al sistema. Un ecosistema fluvial posee una enorme superficie de interacción con los ecosistemas terrestres, de aquí nace la gran importancia de analizar la calidad del agua de los DOS (2) ríos anteriormente citados y sus sedimentos.

Es importante señalar que de acuerdo a: “Normas para el control y clasificación de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos”, podemos clasificar según su uso, el tipo de agua de todos los ríos como “tipo 4”, que son aquellas aguas destinadas a balnearios,

deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia, pero también como aguas “tipo 2 (A o B)” destinadas para riego de vegetales u otro tipo de cultivos para el río Morón, y como aguas “tipo 3”, que son aquellas aguas marinas o de medios costeros destinadas a la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo al río Patanemo.

6.1. Análisis de resultados de caracterización Físico-química en agua

6.1.1. Los metales en los ríos

En las aguas de los ríos analizados, todos los metales excepto Níquel y Plomo presentan niveles inferiores al límite de detección del equipo de absorción atómica, inclusive los valores de estos metales son bastante bajos, con concentraciones igual o menores que 0.5 ppm, sugiriendo que las aguas de estos ríos probablemente no están siendo afectada por estos metales a excepción del níquel y plomo que se describe a continuación.

El níquel (Ni) cuya presencia puede asociarse a presencia de hidrocarburos pesados, es decir, la existencia de derrames de fuentes de almacenamiento de hidrocarburos, como combustibles o lubricantes, o las descargas indebidas de autolavados, centros de lubricación y cambio de aceite, servicios de lanchas, entre otros; excede solo en un 4 % máximo el valor establecido por la norma (0,50 mg/L) para aguas tipo 2 (A o B), en el río Patanemo, determinándose además que en el río Morón permanece por debajo del límite máximo permitido.

El plomo (Pb), es de notable importancia ya que se muestra la bioacumulación de plomo en todos los ríos analizados, valores que se encuentran por encima de los valores máximos permitidos por la norma (0,05 mg/L), en un rango que va de 0,14 mg/L en el río Morón hasta 0,23 mg/L en el río Patanemo; lo que muestra como los metales pesados no se degradan naturalmente y por el contrario pueden permanecer mucho tiempo en área afectada sin cambiar su composición.

6.1.2. Determinación de nutrientes

Los nitritos y nitratos son compuestos de fertilización, extremadamente solubles en agua y resultantes de la descomposición de sustancias

Tabla 3: Concentración de metales en agua de los ríos evaluados

Río	Lugar de Muestra	Concentraciones (mg/L)							
		Ni	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn	Al	Hg
Patanemo	1	0,52	0,19	ND	ND	ND	ND	0,03	ND
	2	0,49	0,23	ND	ND	ND	ND	0,05	ND
Morón	1	0,14	0,14	ND	ND	ND	ND	0,12	ND
	2	0,16	0,16	ND	ND	ND	ND	0,14	ND

1: río arriba 2: desembocadura

Tabla 4: Concentración de nutrientes y otros parámetros en agua de los ríos evaluados

Río	Lugar de Muestra	Concentraciones (mg/L) o (mg CaCO ₃ /L)**										
		NO ₃	T (°C)	pH (U _{pH})	NO ₂	NH ₄	PO ₄	M.O	S.D.	CO ₂	** ALC.	** Durz.
Patanémo	1	0,01	25,6	8,25	ND	0,01	0,36	12	15,58	1778	108	510
	2	0,01	26,4	7,09	ND	0,01	0,35	15	15,32	1745	103	519
Morón	1	0,91	31,8	6,77	0,03	0,05	0,89	175	0,61	1502	265	257
	2	0,91	24,4	6,75	0,02	0,06	0,90	175	0,68	1645	265	257

1: río arriba 2: desembocadura

Tabla 5: Índices de calidad del agua (ICA); Qi y Wi de los ríos evaluados

PARAMETRO	Wi	Qi en Ríos evaluados			
		Morón		Paranemo	
		1	2	1	2
O.D.	0.150	75	90	90	80
PH	0.100	100	100	100	100
D.TEMP	0.100	70	70	100	100
MO	0.100	5	5	80	80
METALES	0.100	80	80	70	80
S.D.	0.060	80	80	90	90
TURB.	0.060	15	15	100	100
NO3	0.060	40	40	100	100
PO4	0.060	40	40	80	80
CONDUCT.	0.030	90	90	100	30
ALCALINIDAD	0.030	90	90	70	70
DUREZA	0.020	20	20	20	20
COLIFORMES	0.130	0	0	100	50
ICA TOTAL		53,05	55,3	89,20	80,10

1: río arriba 2: desembocadura

orgánicas, efluentes domésticos y agroindustriales y abonos de origen sintético o natural.

La concentración y presencia de amoníaco en los ríos, embalses de agua potable y en los acueductos indica por lo general la existencia de contaminantes agrícolas o civiles. Si dicha

presencia es excesiva, puede alterar el olor y sabor del agua potable. En aplicaciones industriales, las altas concentraciones de amoníaco causan corrosión en las tuberías. En las instalaciones pesqueras tanto de agua dulce como de agua de mar, el control del amoníaco es importante, ya que

es muy tóxico para los peces.

El amoníaco se usa comercialmente como fertilizante, bien como tal o en forma de compuestos. Su presencia en aguas pluviales sin tratar indica descomposición microbiológica animal o vegetal y por encima de ciertos niveles críticos es tóxico para los peces.

La principal fuente de fósforo en la naturaleza es la lenta erosión de las rocas y suelos. Plants take-up phosphates through their roots and incorporate them into their cells and tissues. Las plantas de fosfatos a través de sus raíces y los incorporen en sus células y tejidos. When plants are eaten, the phosphorus they contain passes to animals. Cuando las plantas se comen, el fósforo que contienen pasa a los animales. Excreta from animals, together with dead animals and plants, returns phosphorus to the soil via microbial decomposition. Excretas de los animales, junto con los animales muertos y plantas, los rendimientos de fósforo en el suelo a través de la descomposición microbiana. In stable environments, the total quantity of phosphorus therefore stays quite constant as it cycles round the ecosystem. En un entorno estable, la cantidad total de fósforo por lo tanto, se mantiene bastante constante a medida que los ciclos en torno al ecosistema. El aumento de la aportación de fosfatos de origen humano (junto con otros nutrientes como nitratos) puede estimular el crecimiento de plantas en los ríos, y en las flores de algunos casos de algas. This process is known as 'eutrophication'. Este proceso se conoce como "eutrofización". When the resulting blooms of algae and weed die, the process of decomposition strips oxygen from the river water. Cuando las flores resultantes de las algas mueren y malas hierbas, el proceso de descomposición de oxígeno tira de las aguas del río. Las aguas residuales son una importante vía por la que fosfatos pueden entrar en los ríos. The principal sources of phosphates in sewage are human faeces and urine, food wastes (together around 75 % of phosphates in sewage), detergents and industrial effluent that is discharged to sewer. Las principales fuentes de fosfatos en las aguas residuales son las heces y la orina humana, desechos de alimentos (en torno a un 75 % de los fosfatos en las

aguas residuales), los detergentes y los efluentes industriales que se vierten al alcantarillado o directamente a los ríos.

6.1.3. *Sólidos disueltos (SD) y Materia orgánica (MO)*

Principalmente existen cuatro diferentes modos de transportar partículas en el río:

En solución: como iones Na^+ , Cl^- , K^+ , Ca_2^+

En suspensión: Partículas pequeñas flotantes

En saltación: Partículas medianas

En Tracción: Partículas grandes.

Después de precipitaciones fuertes se aumenta la cantidad, la velocidad y la energía del agua y en el agua flotan un sin número de partículas pequeñas.

La materia orgánica es aquella que se forma a partir de elementos vivos o muertos, de plantas y animales presentes en aguas naturales (en estado natural o sin tratar), como por ejemplo en lagos, ríos y embalses. El transporte de materia orgánica en suspensión en las corrientes y ríos cuando son partículas finas mantenidas en suspensión por los remolinos de la corriente y sólo se asientan cuando la velocidad de la corriente disminuye, o cuando el lecho se hace más liso o la corriente descarga en un pozo o lago. También dando rebotes o saltos, a veces tocando el fondo y a veces avanzando en suspensión hasta que vuelven a caer al fondo. A este movimiento se le denomina saltación y es una parte muy importante del proceso de transporte por el agua; en la corriente líquida la altura de los saltos es tan reducida que no se distinguen realmente del arrastre de fondo.

En las aguas corrientes viven una gran variedad de organismos que constituyen sus comunidades animales y vegetales. Dos características merecen ser especialmente destacadas: la primera es que tales comunidades se desarrollan fundamentalmente asociadas al fondo de los ríos y la segunda es que existe una gran variedad de organismos, producto de la enorme heterogeneidad del medio, que alberga una importante diversidad de microhábitats.

Las comunidades vegetales están integradas por el fitoplancton, el perifiton y las macrofitas, y las comunidades animales están representadas fundamentalmente por el macrobentos y las co-

munidades de peces, pero existe también numerosas especies de vertebrados, que no siendo estrictamente acuáticas viven muy ligados al ecosistema fluvial y cuyo papel ecológico no es nada desdeñable.

Toda el agua de la naturaleza contiene organismos vivos que varían de tamaño desde las bacterias y algas microscópicas, hasta los grandes peces. Se ha encontrado que el número de especies de vida acuática en una distancia dada de un río no cambia apreciablemente con los cambios climáticos naturales del ambiente. Los cambios hechos por el hombre al contaminar el agua reducen el número de especies acuáticas. La presencia de materia orgánica en los desechos domésticos, particularmente organismos coliformes fecales (de excrementos) es peligrosa.

La materia orgánica, medida como demanda bioquímica de oxígeno y amonio son un indicador clave del contenido de oxígeno de los cuerpos de agua. Concentrations of these determinants are normally raised as a result of organic pollution, caused by discharges from waste water treatment plants, industrial effluents and agricultural runoff. Las concentraciones de estos constituyentes son normalmente obtenidos como consecuencia de la contaminación orgánica, producida por las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, efluentes industriales y los vertidos agrícolas. High biochemical oxygen demand indicates poor chemical and biological quality of river water and may reduce the biodiversity of aquatic communities and microbiological quality. La alta demanda bioquímica de oxígeno indica deficiente calidad biológica del agua del río y puede reducir la biodiversidad de las comunidades acuáticas y la calidad microbiológica.

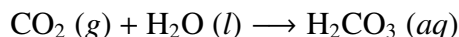
La mayoría de los peces no pueden sobrevivir en agua con menos de 5 ppm (partes por millón) aunque hay algunos que viven en agua de menos de 3 ppm de oxígenos disueltos.

Las mediciones de oxígeno disuelto (OD), junto con la utilización del oxígeno, demanda bioquímica (DBO), son los factores que se usan para determinar el grado de contaminación del agua y tienen un papel muy importante en los indicadores de calidad de agua (ICA).

6.1.4. Dióxido de carbono (CO_2)

Las aguas naturales contienen cantidades significativas de CO_2 disuelto como resultado tanto de la disolución del dióxido de carbono atmosférico como de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica (tratada en el tema anterior). La solubilidad del CO_2 en al agua pura a $25^\circ C$ es de 1,45 g/L, y su variación con la temperatura es tal, que queda demostrada la gran solubilidad del mismo en el agua fría (tal y como le ocurre a cualquier gas, como el oxígeno), es decir a menor temperatura mayor concentración de oxígeno gas disuelto.

Este CO_2 que penetra en el agua genera, en primera instancia, ácido carbónico (H_2CO_3) el cual rápidamente entra a formar parte del complejo equilibrio ácido-base en el que participan las diferentes formas carbonatadas presentes en un agua. Así pues, la química de los procesos ácido-base de un agua natural está dominada por la presencia del ion carbonato, que es una base moderadamente fuerte, así como del ácido débil H_2CO_3 , y de sus interrelaciones. Aunque en un agua la mayor parte del CO_2 disuelto, está como CO_2 rodeado de moléculas de agua, parte estará en la forma de ácido carbónico, de tal forma que cuando se habla en general de ácido carbónico se asume también la parte del gas disuelta (CO_2 (aq)), a pesar de que es esta última es la forma mayoritaria en la que se encuentra. Así, podemos escribir la primera reacción de equilibrio que tiene lugar cuando el CO_2 pasa a la fase acuosa



6.1.5. Alcalinidad

Definimos alcalinidad como la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. No obstante, algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos pueden también contribuir a la alcalinidad de

estar también presentes. Estos iones negativos en solución están comúnmente asociados o pareados con iones positivos de calcio, magnesio, potasio, sodio y otros cationes. El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica y el hidróxido son particularmente importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua.

La alcalinidad, no sólo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis. Históricamente, la alcalinidad ha sido utilizada como un indicador de la productividad de lagos, donde niveles de alcalinidad altos indicarían una productividad alta y viceversa. Dicha correlación se debe en parte a que la disponibilidad del carbono es mayor en lagos alcalinos y también al hecho de que las rocas sedimentarias que contienen carbonatos, a menudo contienen también concentraciones relativamente altas de nitrógeno y fósforo (en comparación con el granito, otras rocas ígneas y regiones donde el lecho rocoso ha sido desgastado y lavado, los cuales generalmente contienen bajas concentraciones de estos dos nutrientes limitantes y del CaCO_3).

Los Rangos de alcalinidad según Kevein [12] son los siguientes medido en:
Baja < 75; media 75 – 150; y alta > 150

6.1.6. Dureza

La dureza de una muestra de agua puede ser definida como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes en dicha muestra, esta concentración se expresa en equivalentes de carbonato de calcio. Una consecuencia de la dureza del agua se refleja de manera crítica en la industria en la formación de incrustaciones y sedimentos en unidades tales como calentadores y calderas, los cuales se ven sometidos a aumentos variables de temperatura. El ablandamiento es la transformación de los compuestos responsables de la dureza del agua en productos insolubles, para ello se utilizan resinas y compuestos químicos, con el objeto de remover los iones metálicos de

las aguas. Los iones responsables de esta dureza son primordialmente los producidos por el calcio y el magnesio (Ca^{+2} y Mg^{+2}) y las aguas que los contienen se denominan aguas duras. De acuerdo a su dureza las aguas pueden clasificarse como: concentración de CaCO_3 (ppm) Muy Suaves 0 a 15; Suaves 16 a 75; Medias 76 a 150; Duras 151 a 300 ; Muy Duras Más de 300. Existen varios métodos para determinar la dureza de una muestra de agua, entre ellos uno de los más empleados en la industria es el método complejométrico. Se denomina complejo a un tipo de compuesto en el cual las moléculas o iones forman enlaces coordinados con un átomo metálico o ion. Estos enlaces de coordinación corresponden a un tipo de enlace covalente en el cual el par de electrones es aportado por una sola especie mientras la otra actúa como aceptora de electrones. La especie de coordinación (llamada ligando) tiene pares simples de electrones que dona al átomo metálico o ion. Cuando el ligando posee más de un par de electrones simples que puede compartir con un mismo átomo central se forman las especies denominadas como quelatos.

6.2. Índice de calidad del agua (ICA)

El Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que en el agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100 %.

El ICA fue desarrollado de acuerdo con las siguientes etapas: La primera etapa consistió en crear una escala de calificación de acuerdo con los diferentes usos del agua. La segunda involucró el desarrollo de una escala de calificación para cada parámetro de tal forma que se estableciera una correlación entre los diferentes parámetros y su influencia en el grado de contaminación. Después de que fueron preparadas estas escalas, se formularon los modelos matemáticos para cada parámetro, los cuales convierten los datos físicos en correspondientes índices de calidad por parámetro (Q_i) (ver Tablas 6, 7, 8, 9, 10 y 11).

Tabla 6: Valores de Qi de Oxígeno disuelto, pH y variación de temperatura

OXIGENO DISUELTO		pH		Delta T (°C)	
VALOR OD	Qi	VALOR	Qi	VALOR	Qi
0 A 01	0 a 5	6,5 a 8,5	100	0	100
01 a 02	5 a 10	0 a 2	0 a 10	de 5 a -5	80 a 100
02 a 03	10 a 50	14 a 12	0 a 10	de-10 a -5	60 a 80
03 a 04	50 a 70	2 a 4	10 a 50	de 10 a 5	50 a 80
04 a 06	70 a 80	12 a 10	10 a 50	de 20 a 10	30 a 50
06 a 08	80 a 90	4 a 6,5	50 a 80	30 a 20	10 a 30
08 a 10	90 a 100	10 a 8,5	50 a 80	más de 30	10 a 0

Tabla 7: Valores de Qi de metales

metales(mg/L)	QI	Valor Max
Ni	0,010	menor 0,50
Pb	0,020	menor 0,05
Cd	0,010	menor 0,005
Zn	0,015	menor 5,00
Cu	0,010	menor 0,20
Cr	0,010	menor 0,05
Al	0,020	menor 1,00
Hg	0,005	menor 0,01
otro caso Qi=0		

Tabla 8: Valores de Qi de M.O. y S.D.

M.O. (mg/L)		S.D. (mg/L)	
VALOR	Qi	VALOR	Qi
0 a 5	100 a 90	0 a 50	80 a 100
5 a 10	90 a 70	50 a 100	100 a 80
10 a 20	70 a 60	100 a 150	80 a 75
20 a 40	60 a 45	150 a 300	75 a 60
40 a 70	45 a 30	300 a 500	60 a 30
70 a 100	30 a 15	más de 500	20
más de 100	5		

Tabla 9: Valores de Qi de dureza

dureza (ppm de CaCO3)	
VALOR	Qi
0 a 15	100 a 90
15 a 75	90 a 70
75 a 150	70 a 50
150 a 300	50 a 20
más de 300	20

Tabla 10: Valores de Qi de Conductividad y alcalinidad

Conductividad		alcalinidad (ppm de CaCO ₃)	
VALOR	Qi	VALOR	Qi
0	100	0 a 75	40 a 60
0 a 1,00	100 a 80	75 a 150	60 a 90
1,00 a 3,00	80 a 60	más de 150	90
3,00 a 6,00	60 a 40		
6,00 a 10,00	40 a 20		
más de 10	20		

Tabla 11: Valores de Qi de turbidez, NO₃ y PO₄

turbidez (NTU)		NO ₃ (mg/L)		PO ₄ (mg/L)	
VALOR	Qi	VALOR	Qi	VALOR	Qi
0-10	100-80	0 a 0,4	100-80	0 a 0,4	100-80
10 a 20	80 - 60	4 a 0,7	80 - 60	4 a 0,7	80 - 60
20 a 50	60 - 40	7 a 1,0	60 - 40	7 a 1,0	60 - 40
50 a 100	40 - 20	1,0 a 2,0	40 - 25	1,0 a 2,0	40 - 25
100 a 500	20 a 10	2,0 a 3,0	25 a 20	2,0 a 3,0	25 a 20
más de 500	10	3,0 a 6,0	20 a 10	3,0 a 6,0	20 a 10
		más de 6,0	10	más de 6,0	10

Debido a que ciertos parámetros son más significativos que otros en su influencia en la calidad del agua, este hecho se modeló introduciendo pesos o factores de ponderación (W_i) ver (Tabla 3), según su orden de importancia respectivo realizado con la colaboración de expertos en el área a nivel nacional e Internacional y consultando autores pioneros en el área como lo son Walski [13] quien propone el uso de parámetros (Oxígeno Disuelto, Temperatura, coliformes, pH, Sólidos, turbidez; transparencia, nitritos, fosfatos, grasas, color y olor) como indicadores organolépticos importantes y otra referencia es Dunnette [14], quien propone de tomar en cuenta el uso que se le va a dar al agua (recreación, para consumo, riego, industria, entre otros); haciendo uso de estas recomendaciones y aplicando la metodología Delphi, que es una de las más usadas en el diseño de índices de calidad, la cual se basa en el uso de un panel de expertos quedaron seleccionados los siguientes parámetros: Oxígeno disuelto, pH, materia orgánica, sólidos disueltos, turbidez, nitratos, fosfatos, conductividad, metales, diferencia

de temperaturas, alcalinidad, dureza y coliformes totales (parámetro que no resulto ser evaluado en la presente investigación pero que resulta importante en el cálculo del ICA). Finalmente, los índices por parámetro son promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua usando el siguiente modelo

$$ICA = (\sum W_i \times Q_i) / \sum W_i$$

7. Conclusiones

La temperatura de los ríos evaluados oscila entre los 24,4°C y 31,8°C, lo que se traduce en una máxima diferencia de temperatura de 7,4°C; siendo estos valores las temperaturas, mínimas y máximas respectivamente tomando en cuenta los valores en las cabeceras y desembocaduras de los ríos evaluados, lo que se traduce en valores esperados dentro de los característicos del clima de la zona.

El pH vario entre 6,75 y 8,51 unidades de pH, donde los valores entre la cabecera y la desembocadura no varían notablemente para el mismo río y se encontró la máxima diferencia en

el río Patanemo con un valor de diferencia de 1,16 unidades de pH; lo que mantiene el resultado en valores normales esperados de ríos de la zona.

El oxígeno disuelto dio como resultado un notable cambio de concentración que va desde 5,36 mg/L río arriba del río Morón, hasta 8,81 mg/L; en la cabecera del río Patanemo, lo cual es relativamente preocupante para el río Morón, ya que valores por debajo de 5 mg/L pone en peligro la vida de algunas especies de peces.

Los valores de nutrientes Nitritos (NO_2) oscilaron entre 0,00 mg/L y 0,03 mg/L Patanemo y Morón respectivamente ; siendo valores relativamente bajos o lo que es lo mismo, de poca afectación en la buena calidad del agua, al igual que los nutrientes Nitratos (NO_3), que oscilaron entre 0,01 mg/L y 0,91 mg/L, Patanemo y Morón respectivamente, de igual manera con el amonio (NH_4) cuyos valores fueron entre 0,01 mg/L y 0,06 mg/L, donde el río con mayor cantidad de estos nutrientes nitrogenados es el río Morón.

El contenido de fosfatos (PO_4) varía entre 0,35 mg/L en el río Patanemo hasta 0,90 en el río Morón, que son valores aceptables de acuerdo a lo esperado para agua de buena calidad.

La materia orgánica (M.O.) dio como resultado 12 mg/L en el río Patanemo y llegó a 175 en el río Morón, lo que indica valores que reflejan baja calidad del agua en este parámetro para el río Morón.

Los Sólidos Disueltos van de 0,61 mg/L a 0,68 en el río Morón y en el río Patanemo que el resultado fue de 15,58 mg/L y 15,32 mg/L (cabecera-costa) lo que indica una buena calidad de agua en este parámetro.

La concentración de CO_2 en los ríos evaluados es característico de aguas estándar a la temperatura a las que fue medido este parámetro (cerca de los 28°C en promedio), dando valores de concentración de CO_2 entre 1502 mg/L y 1778 mg/L.

La alcalinidad registro valores de 103 mg/L en Patanemo hasta 265 mg/L en el río Morón, siendo valores de alcalinidad bajos hasta 75 mg/L, medios entre 75 mg/L y 150 mg/L y altos mayores a 150 mg/L, lo que cambia la calidad del agua de acuerdo al uso que se le quiera dar, lo que de acuerdo a la clasificación propuesta de las aguas

en estudio le da una calificación de media a alta a la calidad de este parámetro desde el punto de vista de productividad fotosintética.

La dureza dio registros mínimos de 257 (ppm de CaCO_3) en el río Morón hasta máximo 519 (ppm de CaCO_3) en el río Patanemo, lo cual puede relacionarse para este último río con los sólidos disueltos, y podemos catalogar a estas aguas en general como aguas que van de duras (150 a 300 ppm de CaCO_3) a Muy Duras (más de 300 ppm de CaCO_3).

El índice de calidad (ICA) de los ríos estudiados nos indica que tenemos un río (Morón) con calidad media, muy cerca de tener mala calidad, y un río (Patanemo) que río arriba tiene una calidad casi excelente que desmejora en su desembocadura hasta tener calidad buena

Agradecimientos

Este proyecto es parcialmente financiado por la Fundación PRODEFAIN de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, en proyecto con Pequiven. Los autores agradecen al Dr. C. Vega del Laboratorio de Procesos Estocásticos del Instituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado IMYCA de la Facultad de Ingeniería por las sugerencias finanel en el manuscrito.

Referencias

- [1] Robert M Brown, Nina I McClelland, Rolf A Deininger, and Ronald G Tozer. A water quality index – do we dare. In *Proceedings of the National Symposium on Data and Instrumentation for Water Quality Management*, volume volume of *Conference of State Sanitary Engineers and Wisconsin University*, pages 364–383, Madison, WIS, USA, July 1970.
- [2] Larry W Canter et al. *Environmental impact assessment*. McGraw-Hill Inc., 2 edition, 1996.
- [3] J Maciunas Landwehr and RA Deininger. A comparison of several water quality indexes. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 48(5):954–958, 1976.
- [4] JM Tyson and MA House. The application of a water quality index to river management. *Water Science and Technology*, 21(10-11):1149–1159, 1989.
- [5] Roberto Behar, María del Carmen Zúñiga de Cardozo, and Olga Rojas Ch. Análisis y valoración del índice de calidad de agua (ica) de la nsf: casos ríos cali y meléndez. 1997.

- [6] Robert E Carlson. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22(2):361–369, 1977.
- [7] L Benejam, E Aparicio, MJ Vargas, A Vila-Gispert, and E García-Berthou. Assessing fish metrics and biotic indices in a mediterranean stream: effects of uncertain native status of fish. *Hydrobiologia*, 603(1):197–210, 2008.
- [8] Joel Zavala Cruz, Sergio Salgado García, Álvaro Marín Aguilar, David Jesús Palma López, Mepivoseh Castelán Estrada, and Rodimiro Ramos Reyes. Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en tabasco. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(2):123–137, 2014.
- [9] María Custodio Villanueva and Rafael Pantoja Esquivel. Impactos antropogénicos en la calidad del agua del río cunas. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 2(2), 2012.
- [10] Frédéric Rimet. Recent views on river pollution and diatoms. *Hydrobiologia*, 683(1):1–24, 2012.
- [11] Eduardo A Lobo, Marilia Schuch, Carla Giselda Heinrich, Adilson Ben Da Costa, Adriana Düpont, Carlos Eduardo Wetzel, and Luc Ector. Development of the trophic water quality index (twqi) for subtropical temperate brazilian lotic systems. *Environmental monitoring and assessment*, 187(6):1–13, 2015.
- [12] R.N. Keven. *Alkalinity water, classification systems*, volume Part 1. The Michigan, 1989.
- [13] Thomas M Walski and Frank L Parker. Consumers water quality index. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 100(3):593–611, 1974.
- [14] DA Dunnette. A geographically variable water quality index used in oregon. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 51(1):53–61, 1979.