

Evaluación de la calidad de las aguas estuarinas usando el coeficiente de concordancia de Kendall modificado

Estuarine water quality assessment using a modified Kendall's coefficient of concordance

Reynaldo José Meza, ^{†a} Iván Camilo Salamanca ^b

Recibido 8 de febrero 2022,
 Aceptado 20 de mayo de 2022

www.unipaz.edu.co

Resumen: El Coeficiente de Concordancia de Kendall (CCK) es una prueba estadística que permite establecer el grado de similitud de un grupo de variables, para las cuales, la magnitud se encuentra expresada en rangos o números ordinales. A través de una modificación en su escala de evaluación, y una redefinición de los términos que lo constituyen, este coeficiente puede ser usado como un indicador de calidad del agua. En el presente estudio se usó el CCK modificado (CCKM), con el objetivo de evaluar el grado de contaminación orgánica de la Ciénaga de La Virgen (una laguna costera localizada en el Distrito de Cartagena de Indias, Colombia). La evaluación se realizó durante el periodo 2011-2014 para poder observar los cambios experimentados en este cuerpo de agua, luego de la entrada en operación del Emisario Submarino, en el año 2013. El CCKM fue estimado en 5 estaciones de calidad del agua, para 5 diferentes combinaciones de las variables: Demanda Bioquímica de Oxígeno—DBO, Coliformes termotolerantes, Sólidos suspendidos totales y Amonio. Estos escenarios se usaron para establecer el nivel de influencia que tiene cada parámetro sobre el indicador. Como medida cuantitativa de esta sensibilidad se utilizó la prueba estadística Raíz del Error Cuadrático Medio—RMSE. Los valores del CCKM estuvieron en un rango de 25.72 a 0.36. Las cifras más altas fueron registradas durante el periodo 2011-2012, y representarían una muy mala calidad del agua. Las cifras más bajas del coeficiente fueron observadas a partir del año 2013, y describen una calidad del agua óptima. Estas variaciones espaciotemporales en los niveles de contaminación de la ciénaga, se encontraron acordes a las registradas en estudios previos. El análisis de sensibilidad, por su parte, reveló que la DBO es la variable más sensible dentro del índice (RMSE= 5.19). En conjunto, estos resultados sustentan el uso del CCKM como herramienta de evaluación de la calidad de las aguas estuarinas. **Palabras claves:** estuarios, W de Kendall, análisis de sensibilidad, índice de contaminación.

Abstract: Kendall's Coefficient of Concordance (KCC), is a statistical test that allows establishing the degree of agreement of a set of variables, whose magnitude is expressed in ranked values or ordinal numbers. Through a modification in its assessment scale and a redefinition of the terms that constitute it, this coefficient can be used as an indicator of water quality. In the present study, the Modified KCC (MKCC) was used, in order to assess the degree of organic contamination of the "Ciénaga de La Virgen" (a coastal lagoon located in the District of Cartagena de Indias, Colombia). The valuation was carried out during the period 2011-2014 to be able to observe the changes experienced in this water body, after the Submarine Emissary entered into operation in 2013. The purpose of this investigation was also to analyze the sensitivity of the coefficient. The MKCC was estimated in 5 water quality stations, for 5 different combinations of variables: Biochemical Oxygen Demand—BOD, Thermotolerant Coliforms, Total suspended solids and Ammonium. As a quantitative measure of this sensitivity, the statistical test Root Mean Square Error—RMSE was used. The values of MKCC were in a range of 25.72 to 0.36. The highest values were registered during the 2011-2012 period, and represent a poor water quality. The lowest values of the coefficient were observed since the 2013, and describe an optimal water quality condition. These changes in the water pollution of the wetland, were according to that registered in previous studies. On the other hand, the sensitivity analysis revealed that BOD is the most sensitive variable within the index (RMSE=5.19). Altogether, these results sustain the use of the MKCC as a tool for assessing the quality of estuarine waters. **Key words:** estuaries, Kendall's W, sensitivity analysis, pollution index.

^a Universidad Nacional de Colombia

^b Universidad Nacional de Colombia

[†] rjmezac@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los estuarios son cuerpos de agua formados por el intercambio de aguas dulces continentales y aguas salobres de los océanos.^{1 2} A escala global, éstos, son considerados como uno de los ecosistemas más productivos, pese a que sólo representan el 15% de las costas del planeta.^{3 4} En términos ecológicos, los estuarios ofrecen además múltiples servicios, como la regulación de los ciclos de nutrientes en los mares, el control de la erosión costera, y la preservación de la fauna marina.⁵ No obstante, a lo largo del último siglo, estos sistemas han sido gravemente afectados por el crecimiento de las poblaciones humanas y el aumento en las descargas de agua residual.^{6 4}

En Colombia, según algunas estimaciones, el litoral Caribe recibía (hasta el año 2016) alrededor de 717.116 m³ diarios de aguas residuales domésticas y cerca de 25.000 toneladas anuales de materiales orgánicos biodegradables, desde las principales ciudades costeras.⁷ Sólo el distrito de Cartagena de Indias descargaba en promedio (para el año 2016) 4260 toneladas anuales de estas sustancias sobre el Mar Caribe, y 114.000 m³ diarios de agua residual (durante el periodo 2006-2010) en la Ciénaga de la Virgen, uno de los estuarios más importantes de la región.^{7 8} Este problema permaneció activo por más de 20 años, hasta el inicio de operaciones del Emisario Submarino, y del sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad, en el año 2013.⁹

Hechos como éste, evidencian el estado de degradación en el que se encuentran actualmente muchos estuarios del territorio colombiano.¹⁰ Con el fin de informar a las comunidades sobre esta situación, algunas instituciones estatales han desarrollado en la última década (de 2011 a 2021), diversos métodos para la evaluación de la contaminación costera.^{11 12} Dentro de éstos, los indicadores de calidad del agua son una de las herramientas de análisis más adecuadas, debido a su facilidad de uso e interpretación.^{10 13}

Los índices o indicadores, son ecuaciones que permiten conocer el grado de polución de un cuerpo de agua, a través de la asociación de los valores de un grupo de parámetros fisicoquímicos o microbiológicos.¹⁴ Generalmente, estas ecuaciones corresponden a una sumatoria o productoria ponderada de dichos parámetros.¹³ Existen también indicadores de calidad del agua, que pueden ser estimados por medio de coeficientes y métodos estadísticos.^{15 16}

El Coeficiente de Concordancia de Kendall (CCK) es una prueba estadística que puede ser usada como índice de contaminación de las aguas marinas y continentales.^{17 15} En las investigaciones de Harkins (1974)¹⁸ y Yusoff (2019)¹⁹ se usó este índice para analizar las variaciones estacionales de la calidad del agua, en ríos de Asia y Norteamérica. En el estudio desarrollado por Gupta (2003)¹⁷, se utilizó este indicador con el objetivo de evaluar los niveles de contaminación, en la bahía de Bombay (India). Por su parte, Fu & Wang (2012)¹⁷ y Rahim & Kasmuri (2020)¹⁷ recomiendan el uso de este método estadístico, en el análisis espaciotemporal de la calidad de las aguas.

Si bien estas investigaciones han sido llevadas a cabo en aguas dulces y salobres, de distintas regiones del planeta, hasta la fecha, no se ha explorado el uso del coeficiente en aguas estuarinas de Colombia. Por ello, en el presente estudio se usa este indicador para evaluar la calidad del agua en la Ciénaga de la Virgen (una laguna costera localizada a orillas del Mar Caribe). También se analiza la sensibilidad del coeficiente, un aspecto que no ha sido revisado en documentos previos.

Coeficiente de Concordancia de Kendall

El Coeficiente de Concordancia de Kendall, o “W de Kendall”, es una medida de acuerdo o desacuerdo entre varios jueces que son asignados a un número definido de observaciones.^{20 21} Dependiendo del campo de aplicación los “jueces” pueden ser variables, parámetros, características, etc.²²

Estadísticamente, el CCK es una razón entre la varianza de la suma de los rangos (R_i), y el máximo valor posible que esta varianza puede tomar ²⁰:

$$CCK = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{Var}$$

Donde R_i es la suma de los rangos para cada fila de la matriz $n \times p$, y R es la media de los valores R_i . “ n ” es el número de observaciones. ²³ El denominador del coeficiente representa la *varianza máxima* de los rangos de las observaciones:

$$Var = \frac{1}{12} \left[p^2(n^3 - n) - p \sum_{k=1}^m (t_k^3 - t_k) \right]$$

En la ecuación anterior “ n ” es el número de observaciones y “ p ” el número de jueces o variables. La sumatoria que se sustrae al final de la expresión, es un factor de corrección para los datos repetidos. En ésta, t_k es el número de rangos repetidos para cada k en “ m ” grupos de repeticiones. ²⁴

El CCK varía entre 0 y 1. Donde 1 corresponde a un perfecto acuerdo o concordancia, y cero indica desacuerdo o independencia entre las muestras. ²⁵

Las aplicaciones del coeficiente de concordancia de Kendall son diversas. Estas comprenden desde estudios económicos y sociológicos ^{23 26 27}; hasta investigaciones en el campo de la medicina. ^{28 29} En el contexto de las ciencias ambientales, el CCK ha sido utilizado en estudios ecológicos y de valoración de los recursos hídricos. ^{20 21 30} También existen investigaciones aplicadas en el área de la arquitectura sostenible y los Sistemas de Información Geográfica. ^{24 31 32}

Algunos autores han explorado además, su uso como indicador de calidad del agua. ^{17 33 34 35} En estos casos, el coeficiente propuesto por Kendall debe ser adaptado para su utilización como prueba

de indicación. ³⁵ La varianza de este CCK modificado (CCKM), se estima a través de la siguiente ecuación:

$$Var_j = \frac{1}{12n} \left[(n^3 - n) - \sum_{k=1}^m (t_k^3 - t_k) \right]$$

Donde Var_j es la varianza del parámetro de calidad del agua “ j ”. Para $j = 1, 2, \dots, p$; donde “ p ” es el número de parámetros de calidad del agua. “ n ” es el número de observaciones más el número de puntos de control ^{17 35}.

De acuerdo con Sutadian et al. (2016)¹⁷ y Terrado et al. (2010)¹⁷ los indicadores de calidad del agua convencionales pueden ser considerados como métodos de evaluación “no objetivos”, debido a que el número y tipo de variables fisicoquímicas (o microbiológicas), son escogidos previamente por un grupo de expertos. Los índices estadísticos como el CCKM, por el contrario, no tienen restricciones en estos aspectos, pues la selección de los parámetros ambientales se realiza según el criterio del usuario. Por tal motivo, éstos, así como otros autores, recomiendan el uso del CCKM frente a las técnicas tradicionales de indicación. ^{35 36 37}

A pesar de estas ventajas, la selección de un número óptimo de variables, así como la influencia que estas tienen dentro del índice, son características del CCKM que no han sido investigadas en detalle. En los estudios previos sobre el tema, no se han realizado análisis de sensibilidad del coeficiente. Hasta ahora, tampoco ha sido usado en la evaluación de la calidad de las aguas estuarinas de Colombia.

Por ello, el presente estudio tiene como objetivos: 1) *Estimar el CCKM para cinco combinaciones distintas de los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno, Coliformes termotolerantes, Sólidos suspendidos totales y Amonio.* 2) *Analizar la sensibilidad de este indicador por medio de la prueba estadística Raíz del Error Cuadrático*

Medio—RMSE. 3) Evaluar la calidad de las aguas en la Ciénaga de la Virgen, usando el CCK como índice de contaminación.

MÉTODOS

Área de estudio.

Los datos para la realización de este estudio fueron recolectados por la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique—CARDIQUE, en 5 puntos distintos de la Ciénaga de la Virgen (Cartagena de Indias, Colombia). En la Figura 1 se muestra la localización de las estaciones, en las que fueron tomadas las muestras de agua.

Figura 1. Localización de las estaciones de calidad del agua (Ciénaga de la Virgen). Fuente: Autores.



Como puede verse en la figura, los puntos 2 y 4 se ubican en la zona suroccidental de la ciénaga, mientras que las estaciones 6 y 7 en la zona suroriental. Estas estaciones se encuentran en el área de influencia de “La Bocana”, una estructura hidráulica que dirige el flujo de agua procedente del mar, hacia el sur de la laguna.⁹ Estos puntos se hallan también, cerca de la desembocadura de los canales de drenaje de aguas pluviales más importantes de la ciudad.

La estación “Punto 10” se localiza unos kilómetros más al norte de las anteriores. Esta zona de la ciénaga se caracteriza por la presencia de una extensa superficie de bosque de manglar, y porque además, se encuentra influenciada por los cambios en las mareas. El territorio que rodea a la laguna en esta área, se encuentra menos urbanizado, en relación con la zona sur.

Históricamente, la zona sur de la ciénaga ha presentado un mayor nivel de contaminación de las aguas, respecto a la zona norte.⁹ Este fenómeno fue atribuido a los altos volúmenes de agua residual que, hasta el año 2013, eran descargados en este cuerpo de agua.⁹ El crecimiento de las poblaciones humanas en esta zona ha sido considerado también como una de las causas.³⁸

Si bien, esta distribución espacial en la calidad del agua no ha presentado alteraciones significativas a lo largo de los años, no debe ser considerada como una condición permanente. En la tabla 1 puede verse que algunas variables presentan valores que no se ajustan a estas tendencias. La razón de este comportamiento podría hallarse en la desigual distribución de la salinidad de la ciénaga, así como en los aportes de materia orgánica procedentes de los bosques de manglar.

Parámetros de calidad del agua

Los parámetros fisicoquímicos usados en esta investigación fueron registrados en la Ciénaga de la Virgen, entre los años 2011 y 2014 (Tabla 1). Éstos, representan el proceso de biodegradación de materiales orgánicos en las aguas.³⁹ Su estimación, se realizó de acuerdo con la Edición 22 del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*⁴⁰, y según los siguientes procedimientos:

- *Demanda Bioquímica de Oxígeno* (DBO): Sección 5210-B prueba de DBO 5-días; y sección 4500-O-G Método del electrodo de Membrana.

- *Coliformes termotolerantes* (CT): Tubos múltiples.
- *Sólidos suspendidos totales* (SST): Sección 2540-D
- *Amonio* (NH₄⁺): Sección 4500-NH₃-B-C

Cálculo del CCKM

En el presente estudio se utilizó el término *Coficiente de Concordancia de Kendall Modificado* (CCKM), para diferenciar el uso del CCK como índice de calidad del agua, de su aplicación como prueba estadística. Esta modificación del coeficiente es conocida también por el nombre de “*Índice de Harkins*”.^{15 36} En los anexos, se describen los pasos para la estimación de este indicador.

En total, 20 observaciones de cada variable fueron utilizadas para el cálculo del coeficiente (Tabla 1).

Análisis estadístico

El CCKM fue calculado para 5 diferentes escenarios (Tabla 2). Cada uno de estos escenarios correspondió a una combinación distinta de los 4 parámetros evaluados. En el primero de ellos, se utilizaron las cuatro variables de manera simultánea. En los restantes, se sustrajo solamente una variable.

Este análisis, conocido como “*Análisis de sensibilidad de un parámetro a la vez*”, se usó para medir el grado de influencia que tiene cada parámetro sobre el resultado final del índice.¹⁴ Como medida cuantitativa de esta sensibilidad, se utilizó la prueba estadística *Raíz del Error Cuadrático Medio—RMSE*:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CCKM_R - CCKM_i)^2}$$

En la ecuación anterior, “n” es el número de observaciones. CCKM_i es el valor del coeficiente,

obtenido en cada escenario. CCKM_R es el CCKM de referencia o aquél correspondiente a la combinación de parámetros DBO+CT+SST+NH₄⁺.⁴¹

Debido a que el RMSE es una medida estadística que utiliza dimensiones, sus valores fueron normalizados respecto a la desviación estándar del CCKM en el escenario I.⁴² Así, un RMSE normalizado entre 0 y 0.5 indicaría una muy baja influencia de la variable sobre el CCKM, mientras que valores superiores a 0.7 reflejarían la mayor sensibilidad respecto al índice.⁴²

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2 a 6 se presentan los valores del CCKM, calculados durante el periodo 2011-2014. En éstas, la línea punteada representa el CCKM para el control B, así como la peor condición de calidad del agua (definida según la normatividad). Aquellos valores por encima de este límite, corresponderían a un nivel de contaminación orgánica excesivamente alto.

En conjunto, para los cinco escenarios, el rango del CCKM estuvo comprendido entre 0.36 y 25.72. Las cifras más bajas se observaron en la estación Punto 4, durante el año 2014. Las cifras más altas, por su parte, se registraron en el año 2012 para la estación Punto 6. Estos valores representarían calidades del agua óptimas y muy malas, respectivamente.

En todos los escenarios se observó una disminución de la contaminación orgánica, a partir del año 2013. Sólo la estación Punto 6, presentó niveles elevados de polución hasta el año 2014. Estos resultados podrían deberse a que esta estación se halla en la antigua zona de descargas de aguas residuales, y cerca de la desembocadura de uno de los canales de aguas pluviales. También es posible que la tasa de descomposición de materiales orgánicos en el punto 6, haya sido menor que en otras estaciones.

Tabla 1. Variables de calidad del agua y sus respectivos rangos.

Año	NOMBRE	DBO	RDBO	NH4+	RNH4+	CT	RCT	SST	RSST
2011	PUNTO 2	6.85	12	0.38	8	17	7	30	6
	PUNTO 4	4.00	9	0.25	3	2	3	44	9
	PUNTO 6	15.84	18	0.52	11	1.8	2	121	19
	PUNTO 7	13.1	17	0.34	6	790	11	63	16
	PUNTO 10	16.18	19	0.36	7	1.8	2	91	17
2012	PUNTO 2	10.86	14	0.52	11	15000	14	52	13
	PUNTO 4	16.56	20	0.64	13	630	10	52	13
	PUNTO 6	30.80	22	1.74	15	5200000	15	54	15
	PUNTO 7	23.75	21	1.79	16	1.8	2	53	14
	PUNTO 10	6.24	11	0.47	10	9800	13	49	12
2013	PUNTO 2	1.46	4	0.45	9	13	6	45	10
	PUNTO 4	0.72	2	0.38	8	1.8	2	38	8
	PUNTO 6	2.82	7	0.53	12	3.6	4	27	4
	PUNTO 7	2.12	6	0.47	10	2	3	32	7
	PUNTO 10	4.85	10	0.31	5	1.8	2	25	2
2014	PUNTO 2	1.52	5	0.288	4	130	9	26	3
	PUNTO 4	1.11	3	0.288	4	1.8	2	28	5
	PUNTO 6	10.88	15	0.82	14	110	8	53	14
	PUNTO 7	12.18	16	0.288	4	4	5	32	7
	PUNTO 10	7.06	13	0.288	4	13	6	46	11
	CONTROL A	0.00	1	0.00	1	0	1	0	1
	CONTROL B	3.00	8	0.2	2	2000	12	120	18
	VARIANZA		40.25		39.95		39.41		40.18

Nota: Los coliformes termotolerantes (CT) se encuentran en unidades de NMP/100ml. Las restantes variables en mg/L.

Los anteriores resultados se encuentran acordes a los obtenidos por Arenas y Serge (2015)⁹, AQUALOGY (2016)⁴³, y CARDIQUE (2017)³⁸. De acuerdo con estas investigaciones, el estado de la ciénaga mejoró considerablemente luego de que fueran suspendidas las descargas de agua residual y entrara en operación el Emisario Submarino, en el año 2013. El uso del CCKM permitió además confirmar las observaciones de Maldonado et al. (2011)⁸, Arenas y Serge (2015)⁹, y CARDIQUE (2017)³⁸, según los cuales, el mayor grado de contaminación se registraba en la zona sur y suroriental del estuario.

En relación con el análisis de sensibilidad, pudo comprobarse que la DBO fue la variable más sensible dentro del indicador, seguida por los SST, y el amonio (Tabla 2). A diferencia de éstas, los coliformes termotolerantes experimentaron una menor influencia respecto al CCKM. El hecho de que este último haya sido el parámetro menos sensible, revela un aspecto del coeficiente que ha sido poco estudiado: *su dependencia estricta a la posición de cada observación.*⁴⁴

Tabla 2. Medidas estadísticas del CCKM para los diferentes escenarios.

Escenario	Variables	Max.	Min.	RMSE	D.E.	RMSEN
I	DBO, NH4+, CT, SST	25.72	0.76	—	7.1	—
II	DBO, NH4+, CT	20.84	0.36	3.77	5.39	0.53
III	DBO, NH4+, SST	20.75	0.73	1.98	6.39	0.27
IV	DBO, CT, SST	20.81	0.53	2.42	6.07	0.34
V	NH4+, CT, SST	14.76	0.45	5.19	4.19	0.73

* Max.= Máximo; Min= Mínimo; D.E.= Desviación estándar; RMSEN= RMSE Normalizado

Como puede verse en la tabla 1 y en las figuras 2 a 6, los valores del CCKM dependen totalmente del rango, y sólo parcialmente de la magnitud de las variables. En el caso de los CT, los rangos no presentaron alteraciones significativas con el incremento en las poblaciones de coliformes (pese a que su número varía entre 0 y 5×10^6 NMP). Esta

característica no suele observarse en los indicadores de calidad del agua convencionales, debido a que estos generalmente utilizan funciones continuas, ligadas a una escala de valoración fija.¹¹

Figura 2. Valores del CCKM para el escenario I.

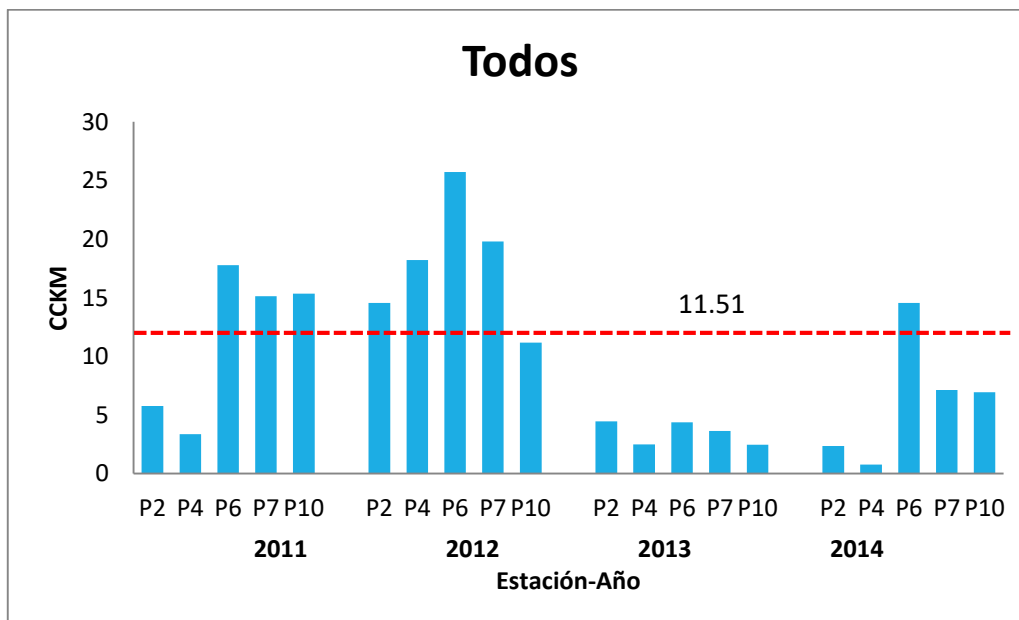


Figura 3. Valores del CCKM para el escenario II.

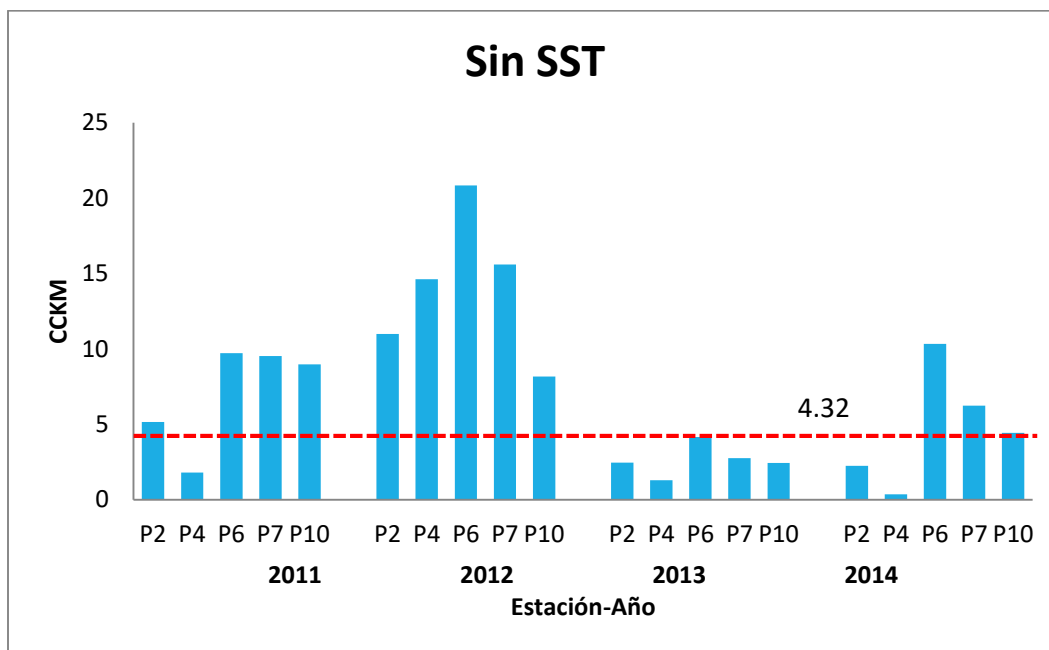


Figura 4. Valores del CCKM para el escenario III.

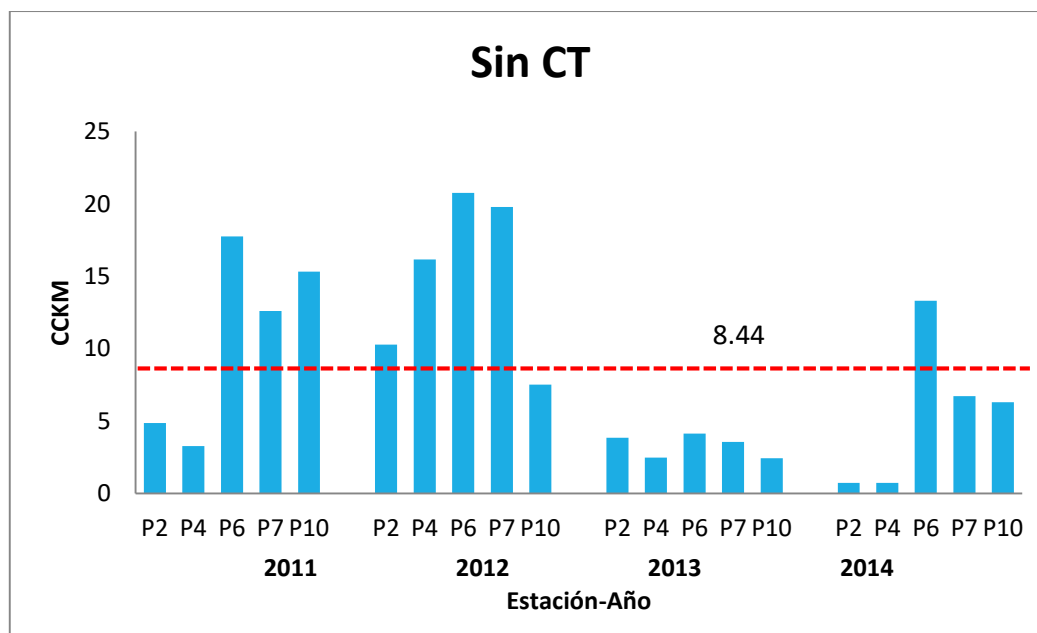


Figura 5. Valores del CCKM para el escenario IV.

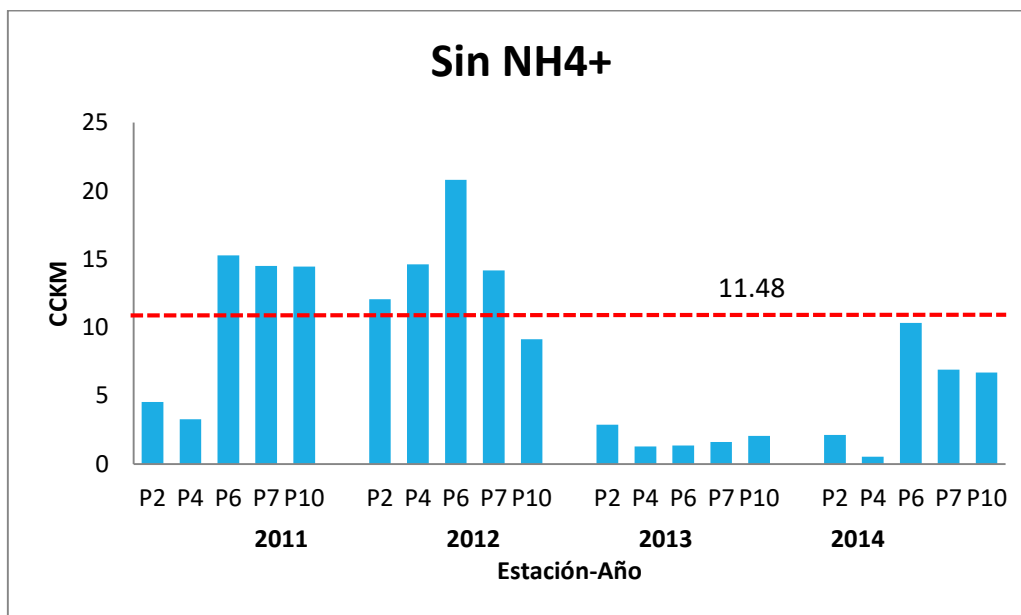
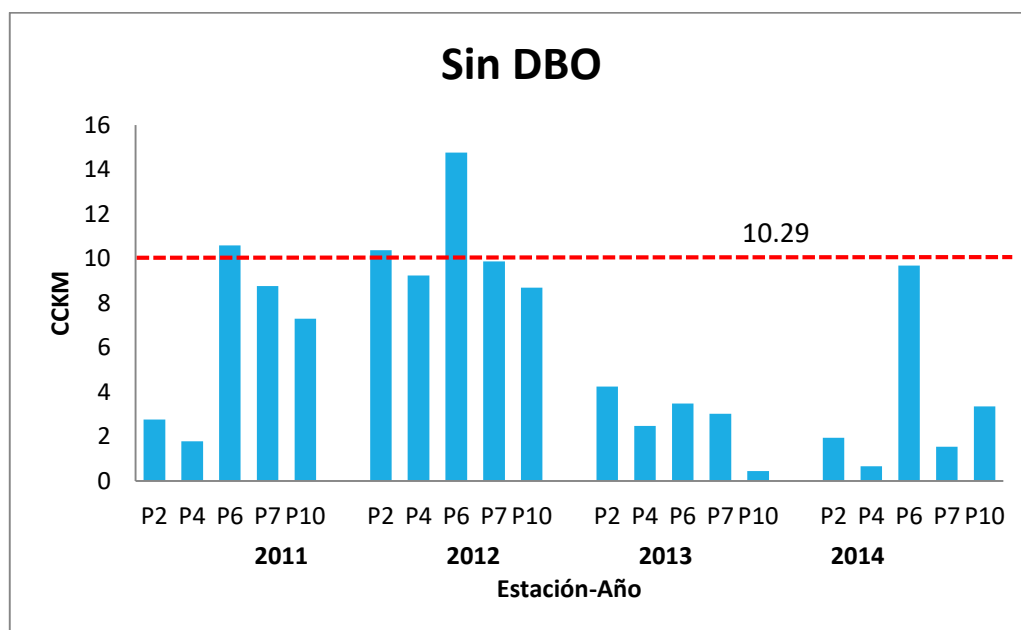


Figura 6. Valores del CCKM para el escenario V.



CONCLUSIONES

En la anterior investigación se ha descrito el uso del Coeficiente de Concordancia de Kendall, como índice de contaminación de las aguas estuarinas. La evaluación de la calidad del agua en la Ciénaga de la Virgen, con este indicador, permitió observar una reducción en los niveles de polución a partir del año 2013. Los 5 escenarios evaluados por medio del coeficiente reflejaron esta misma tendencia, y mostraron además una variación espaciotemporal similar. La aplicación del CCKM en conjunto con el análisis de sensibilidad, reveló, por su parte, que la DBO es el parámetro que mayor influencia tiene sobre la calidad del agua de esta laguna costera. Si bien, estos resultados sustentan el uso del CCKM como prueba de indicación, se sugiere que este coeficiente sea usado únicamente en el análisis de tendencias, pues carece de una escala para la valoración cualitativa de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique—CARDIQUE por suministrar los datos para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Cañedo-Argüelles M, Boix D, Sánchez-Millaruelo N, et al. A rapid bioassessment tool for the evaluation of the water quality of transitional waters. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2012;111:129-138.
- Krvavica N, Gotovac H, Lončar G. Salt-wedge dynamics in microtidal Neretva River estuary. *Reg Stud Mar Sci.* 2021;43:101713.
- Rodríguez-Chila JD, Mancera-Pineda JE, López-Salgado HJ. Efectos de la recomunicación del río Magdalena con su antiguo delta: Cambios en la producción primaria fitoplanctónica y respiración en el Complejo Pajarales, 1989 a 2005. *Bol Investig Mar y Costeras.* 2009;38(2):119-144.
- Roshni K, Renjithkumar CR, Raghavan R, Ranjeet K. Fish distribution and assemblage structure in a hydrologically fragmented tropical estuary on the south-west coast of India. *Reg Stud Mar Sci.* 2021;43:101693.
- Barbier EB, Hacker SD, Kennedy C, Koch EW, Stier AC, Silliman BR. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol Monogr.* 2011;81(2):169–193.
- Taillardat P, Marchand C, Friess DA, et al. Respective contribution of urban wastewater and mangroves on nutrient dynamics in a tropical estuary during the monsoon season. *Mar Pollut Bull.* 2020;160(September):111652.
- INVEMAR. *Informe Del Estado de Los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros de Colombia. Año 2015.*; 2016.
- Maldonado W, Baldiris I, Díaz J. Evaluación de la calidad del agua en la Ciénaga de la Virgen (Cartagena, Colombia) durante el período 2006-2010. *Rev Científica Guillermo Ockham.* 2011;9(2):79-87.
- Arenas D, Serje N. Variación de la calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen producto de la implementación del Emisario Submarino. 2015.
- INVEMAR. Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras en el Caribe y Pacífico Colombianos. 2020.
- INVEMAR. *Formulación Del Índice de Calidad de Aguas Costeras Para Los Países Del Proyecto SPINCAM. Documento Metodológico.* Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras—INVEMAR; 2011.
- INVEMAR. *Proyecto: Determinación de Objetivos de Calidad Por Usos Del Recurso Hídrico En La Bahía de Buenaventura – Sector Cascajal, a Través de La Modelación de Coliformes y DBO Para Definir Diferentes Escenarios de Calidad Del Agua. Informe Técnico Final.* Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras—INVEMAR; 2015.
- Uddin MG, Nash S, Olbert AI. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecol Indic.* 2021;122:107218.

14. Chang N, Luo L, Wang XC, Song J, Han J, Ao D. A novel index for assessing the water quality of urban landscape lakes based on water transparency. *Sci Total Environ.* 2020;735:139351.
15. Sutadian AD, Muttill N, Yilmaz AG, Perera BJC. Development of river water quality indices — a review. *Env Monit Assess.* 2016;188(58).
16. Ali ZM, Ibrahim NA, Mengersen K, Shitan M, Juahir H. Robust principal component analysis in water quality index development. *AIP Conf Proc.* 2014;1602:1091-1097.
17. Gupta AK, Gupta SK, Patil RS. A Comparison of Water Quality Indices for Coastal Water. *J Environ Sci Heal.* 2003;A38(11):2711–2725.
18. Harkins RD. An objective water quality index. *J (Water Pollut Control Fed.* 1974;46(3):588-591.
19. Yusoff MK, Mohamed KN, Ismail MZ, Johan S, Hashim NHM. Physico-chemical assessment of water resources in Pulau Pangkor, Perak, Peninsular Malaysia. *Malaysian For.* 2019;82(1):17-26.
20. Legendre P. Species Associations: The Kendall Coefficient of Concordance Revisited. *J Agric Biol Environ Stat.* 2005;10(2):226-245.
21. Abeka E, Asante FA, Laube W, Codjoe SNA. Contested causes of flooding in poor urban areas in Accra, Ghana: an actor-oriented perspective. *Environ Dev Sustain.* 2020;22(4):3033-3049.
22. Legendre P. Coefficient of concordance. In: *Encyclopedia of Research Design.* SAGE Publications Los Angeles; 2010:164-170.
23. Akhmetshin EM, Plaskova NS, Iusupova II, Prodanova NA, Leontyev AN, Vasilev VL. Dataset for determining rational taxation value with incompatible criteria of economic efficiency and equity. *Data Br.* 2019;26(104532).
24. Gearhart A, Booth DT, Sedivec K, Schauer C. Use of Kendall's coefficient of concordance to assess agreement among observers of very high resolution imagery. *Geocarto Int.* 2013;28(6):517-526.
25. Grzegorzewski P. The coefficient of concordance for vague data. *Comput Stat Data Anal.* 2006;51(1):314-322.
26. Capella Peris C, Gil Gómez J, Martí Puig M, Ruiz-Bernardo P. Construcción de un cuestionario para medir el emprendimiento social en educación física. *Pedagog Soc Rev Interuniv.* 2016;(28):169.
27. Stelk S, Park SH, Medcalfe S, Dugan MT. An additional analysis of estimation techniques for the degree of financial leverage. *Rev Financ Econ.* 2018;36(3):220-231.
28. Goetz CG, Stebbins GT, Chmura TA, Fahn S, Poewe W, Tanner CM. Teaching program for the Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale: (MDS-UPDRS). *Mov Disord.* 2010;25(9):1190-1194.
29. Das S, Obaidullah SM, Santosh KC, Roy K, Saha CK. Cardiotocograph-based labor stage classification from uterine contraction pressure during ante-partum and intra-partum period: a fuzzy theoretic approach. *Heal Inf Sci Syst.* 2020;8(16).
30. Hajkowicz S, Higgins A. A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *Eur J Oper Res.* 2008;184:255-265.
31. Nguyen A, Reiter S. A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models. *Build Simul.* 2015;8(6):651-664.
32. Chan DWM, Olawumi TO, Ho AML. Perceived benefits of and barriers to Building Information Modelling (BIM) implementation in construction: The case of Hong Kong. *J Build Eng.* 2019;25(100764).
33. Berzas JJ, García LF, Rodríguez RC, Martín-Alvarez PJ. Evolution of the water quality of a managed natural wetland: Tablas de Daimiel National Park (Spain). *Water Res.* 2000;34(12):3161-3170.
34. Ling LF. Comparison of water quality index (WQI) between DOE method and Harkin's index. 2007.
35. Fu L, Wang Y-G. Statistical Tools for Analyzing

- Water Quality Data. In: *Water Quality Monitoring and Assessment*. InTech; 2012:602.
36. Akkoyunlu A, Akiner ME. Pollution evaluation in streams using water quality indices: A case study from Turkey's Sapanca Lake Basin. *Ecol Indic*. 2012;18:501-511.
 37. Kim AG, Cardone CR. Scatterscore: A reconnaissance method to evaluate changes in water quality. *Environ Monit Assess*. 2005;111(1-3):277-295.
 38. CARDIQUE. *Evaluación de La Calidad de Las Aguas En La Ciénaga de La Virgen*. Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique-CARDIQUE; 2017.
 39. Phu STP. Research on the Correlation Between Chlorophyll-a and Organic Matter BOD, COD, Phosphorus, and Total Nitrogen in Stagnant Lake Basins. In: *Sustainable Living with Environmental Risks*. ; 2014:177-191.
 40. IDEAM. Resolución 2050 de 2017. 2017.
 41. Hosseini N, Chun KP, Wheeler H, Lindenschmidt KE. Parameter Sensitivity of a Surface Water Quality Model of the Lower South Saskatchewan River—Comparison Between Ice-On and Ice-Off Periods. *Environ Model Assess*. 2017;22(4):291-307.
 42. Gonzaga M, de Oliveira A, de Jesus R, Nascimento A, Almeida C, Guirado G. Sensitivity Analysis and Calibration of Hydrological Modeling of the Watershed Northeast Brazil. *J Environ Prot (Irvine, Calif)*. 2015;6(08):837.
 43. AQUALOGY. Informe final monitoreo ambiental de los cuerpos de aguas relacionados con la operación del suministro de agua potable y descarga del emisario submarino de Cartagena. 2016.
 44. Schaeffer DJ, Janardan KG. Development and Applications of Five New Water Quality Indices. *Biometrical J*. 1979;21(6):539-552.

ANEXOS

a) *Organizar los registros de las variables.* Los valores de cada parámetro se organizan por columnas, de modo que las observaciones de DBO, CT, SST, y NH_4^+ que hayan sido registradas en un mismo punto y para una misma fecha, se correspondan (Tabla 1). Una vez organizados, se define el número de datos para el cálculo de la varianza. En éste caso, el término “n” correspondió a 22 (20 observaciones más dos puntos de control).

b) *Definir los controles de cada parámetro.* Los controles son valores de las variables, que representan las distintas condiciones de calidad del agua. Generalmente, éstos, corresponden a los niveles máximos y mínimos definidos por las normas ambientales de cada país. ¹ También pueden utilizarse valores teóricos o “ideales”, pues no siempre las instituciones estatales poseen un criterio específico para los distintos cuerpos de agua (ríos, lagos, ciénagas, etc.).²

De acuerdo con el *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras de Colombia–INVEMAR* ³, el nivel óptimo de DBO y SST, en las aguas marinas y costeras, es de 0 mg/L. Un nivel pésimo, por su parte, se alcanzaría para concentraciones superiores a 3 mg/L y 120 mg/L, respectivamente. Según esta institución, la calidad de las aguas estuarinas puede ser considerada como “excelente” y “pésima”, para poblaciones de coliformes termotolerantes, de 0 y 2000 NMP/100ml, respectivamente.

Para las ciénagas de Colombia, se considera como adecuada una concentración de amonio de 0 a 0.2 mg/L. ²

Los controles de cada variable corresponderán entonces, a estos límites superiores e inferiores (Ver tabla 1).

c) *Asignar los rangos de las observaciones.* Los rangos (*ranked values*), son números naturales que se asignan a cada una de las observaciones de acuerdo a su magnitud, y en una escala ascendente

(Tabla 1). En este estudio, el rango R_c para los controles de DBO, SST, CT, y NH_4^+ fue de 1. Esto se debe a que un nivel de cero para estas variables, representa la primera posición (o la posición 1) en su respectiva escala. Las observaciones restantes de DBO, CT, NH_4^+ y SST tendrán puntuaciones entre 1 y 22.

En caso de existir datos repetidos estos tendrán un mismo rango. En esta investigación, la DBO fue la única variable que no presentó observaciones repetidas.

d) *Calcular la varianza de cada parámetro.* Debido a que Var_j depende del número de observaciones y puntos de control, y además, el tamaño de la muestra fue el mismo en todos los parámetros, la varianza para las distintas variables fue muy similar (Tabla 1). Como en este caso no se presentaron datos repetidos para la DBO, la varianza de este parámetro se estimó de la siguiente manera:

$$\text{Var}_j = (n^2 - 1)/12$$

La varianza del amonio, los coliformes y los sólidos suspendidos totales, se evaluó según la Ecuación 3, pues fue necesario hacer el ajuste para los datos repetidos. En Akhmetshin (2019)⁴, Linebach et al. (2014)⁵ y Harkins (1974)¹, pueden verse algunos ejemplos de cálculo relacionados con este aspecto del índice.

e) *Estimar el coeficiente a partir de la información anterior.* La estimación del CCKM se realizó a través de la expresión:

$$\text{CCKM} = \sum_{j=1}^p (R_i - R_c)^2 / \text{Var}_j$$

En la ecuación anterior, “p” es el número de parámetros de calidad del agua. R_i es el rango de la observación “i” (para $i=1,2,\dots, n$). R_c es el rango asignado al control inferior del parámetro

fisicoquímico evaluado. “Var_j” es la varianza del parámetro de calidad del agua “j”, estimada según la ecuación 3.

El siguiente ejemplo ilustra el cálculo del CCKM para la muestra de agua recolectada durante el año 2012, en la estación Punto 10. Considérese a [6.24 0.47 9800 49] y [11 10 13 12], como los vectores que representan las concentraciones de DBO, NH₄⁺, CT, SST y sus respectivos rangos. El CCKM se estimaría entonces así:

$$\text{CCKM} = \frac{(11 - 1)^2}{40.25} + \frac{(10 - 1)^2}{39.95} + \frac{(13 - 1)^2}{39.41} + \frac{(12 - 1)^2}{40.18}$$

$$\text{CCKM} = 11.17$$

Como puede verse, la estimación del CCKM corresponde a la suma ponderada de las concentraciones normalizadas de DBO, CT, SST, y NH₄⁺. Éste procedimiento de cálculo es similar al utilizado por los indicadores de calidad del agua convencionales.⁶ No obstante, a diferencia de éstos, el CCKM no requiere de la construcción de curvas de subíndice. Tampoco utiliza pesos predefinidos, y no posee limitaciones en cuanto al número de variables a implementar.⁷

El CCKM puede ser considerado un índice de tipo sumatoria, en el que la varianza equivale al peso de cada parámetro, y la diferencia (R_i—R_c)² a la curva de subindicación.⁶

REFERENCIAS

1. Harkins RD. An objective water quality index. *J (Water Pollut Control Fed.* 1974;46(3):588-591.
2. Alean Vera LE. Modelación de la capacidad máxima de asimilación de vertimientos de carga orgánica en la Ciénaga de Mesolandia en el Departamento del Atlántico. 2009;3.
3. INVEMAR. *Formulación Del Índice de Calidad de Aguas Costeras Para Los Países Del Proyecto SPINCAM. Documento Metodológico.* Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras—INVEMAR; 2011.
4. Akhmetshin EM, Plaskova NS, Iusupova II, Prodanova NA, Leontyev AN, Vasilev VL. Dataset for determining rational taxation value with incompatible criteria of economic efficiency and equity. *Data Br.* 2019;26(104532).
5. Linebach JA, Tesch BP, Kovacsiss LM. *Nonparametric Statistics for Applied Research.* New York: Springer Science+Business Media; 2014.
6. Uddin MG, Nash S, Olbert AI. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecol Indic.* 2021;122:107218.
7. Sutadian AD, Muttill N, Yilmaz AG, Perera BJC. Development of river water quality indices — a review. *Env Monit Assess.* 2016;188(58).