

Diseño e implementación de un monitoreo de calidad de las aguas: revisión de la literatura y el Río Almendares como caso de estudio

Design and implementation of a water quality monitoring: literature review and Almendares River as a case study

Jeny Adina Larrea Murrell (0000-0002-6067-6331)^{a,*}
Beatriz Romeu Alvarez (0000-0002-4265-290X)^a
Daisy Lugo Moya (0000-0002-8401-1430)^a
Marcia M. Rojas Badía, (0000-0003-4958-1873)^a

^a Universidad de La Habana
* adina@fbio.uh.cu

Recibido: 21 de enero de 2021;

Aceptado: 05 de mayo de 2022;

RESUMEN

Los ecosistemas dulceacuícolas son importantes fuentes de agua dulce y recursos imprescindibles para el desarrollo de diferentes actividades económicas. El monitoreo de la calidad de agua de estos sistemas es importante para su preservación y para prevenir riesgos para la salud humana. El presente trabajo aborda los principales aspectos informados en la literatura relacionados con el monitoreo de la calidad de las aguas en ecosistemas dulceacuícolas superficiales. Se analizan ejemplos de investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo que ilustran los aspectos a tener en cuenta durante un monitoreo de calidad de agua, particularizando el caso del río Almendares (La Habana, Cuba), el cual ha sido evaluado por un periodo de más de 15 años.

Palabras claves: ecosistemas dulceacuícolas, indicadores calidad de agua, contaminación

ABSTRACT

Freshwater ecosystems are important sources of freshwater and essential resources for the development of different economic activities. Monitoring the water quality of these systems is important for their preservation and to prevent risks to human health. The present work addresses the main aspects reported in the literature related to the monitoring of water quality in superficial freshwater ecosystems. Examples of research carried out in different parts of the world are analyzed, illustrating the aspects to be taken into account during water quality monitoring, particularly the case of the Almendares River (Havana, Cuba), which has been evaluated for a period of more than 15 years.

Keywords: freshwater ecosystems, water quality indicators, contamination.

INTRODUCCION

Los ecosistemas dulceacuícolas y en particular, los ríos, son importantes fuentes de agua dulce y recursos imprescindibles para el desarrollo de diferentes actividades socioeconómicas (Anitha and Ravikumar, 2014; Kebede *et al.*, 2020). Sin embargo, el incremento de la población, la expansión de las actividades industriales y agrícolas y la contaminación fecal producida por el ser humano, constituyen importantes factores para el rápido deterioro de los ecosistemas dulceacuícolas (Awoke *et al.*, 2016; Garda *et al.*, 2017; Nhiwatiwa *et al.*, 2017; Lusiana *et al.*, 2022). Por esta razón se hace necesario el monitoreo y control de la calidad del agua utilizada para diferentes fines.

Para el diseño e implementación de un programa de monitoreo de la calidad de las aguas en ecosistemas dulceacuícolas superficiales, se deben tener en cuenta: los objetivos del estudio, la descripción del área de estudio, la descripción de los sitios de muestreo, los indicadores de calidad de agua a ser analizados, la frecuencia y periodo de muestreo, el plan para el control y aseguramiento de la calidad, los recursos humanos, técnicos y financieros, así como el procesamiento e informe de los datos (Bartram and Ballance, 1996; APHA, 2012; Behmel *et al.*, 2016). El presente trabajo aborda los principales aspectos informados en la literatura relacionados con el monitoreo de la calidad de las aguas en ecosistemas dulceacuícolas superficiales. Se analizan ejemplos de investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo que ilustran los aspectos a tener en cuenta durante un monitoreo de calidad de agua, particularizando el caso del río Almendares (La Habana, Cuba), el cual ha sido evaluado por un periodo de más de 15 años.

BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

Se realizó una búsqueda bibliográfica de artículos completos, en español e inglés, de literaturas publicadas en bases de datos electrónicas como PubMed, Scopus, ResearchGate, SciFinder, Scielo, Global Health y Google Académicos, utilizando combinaciones de los términos: monitoreo calidad de agua, indicadores de contaminación fecal, indicadores calidad de agua, ecosistemas acuáticos, análisis multivariado.

La revisión realizada es de tipo narrativo donde se seleccionaron publicaciones de los últimos 10 años, entre 2012 y 2022. Esta literatura posteriormente se complementó con publicaciones de otros años, obteniéndose un total de 68 documentos, contando con artículos científicos publicados, tesis, normas de calidad y libros de textos. Se consultó literatura relacionada con campos como ciencia ambiental y ecología.

MONITOREO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN ECOSISTEMAS DULCEACUÍCOLAS

Objetivos del estudio

El objetivo es el fin a que se dirige una acción, por lo que debe estar bien definido desde el principio, ya que de este dependerá en gran medida el diseño del programa de monitoreo, la selección de las variables a analizar y además el costo económico del programa de monitoreo (Crocker and Bartram, 2014; Behmel *et al.*, 2016), aspecto a tener en cuenta fundamentalmente en países en vías de desarrollo.

Los objetivos de un muestreo, pueden estar relacionados con la verificación de que la calidad de un cuerpo de agua es apropiada para el uso que se le da (recreativo, potable, agrícola, etc.) (APHA, 2012; Peletz *et al.*, 2016). También pudiera estar relacionado con determinar las características de un ecosistema acuático y cómo puede ser afectado por la presencia de contaminantes derivados de las actividades antropogénicas, lo cual se conoce como monitoreo de impacto. En este sentido, Baptista y Santos (2015), informaron los resultados acerca de la implementación de un programa de monitoreo de la calidad de agua superficial de la Reserva Natural Paul do Boquilobo, en Portugal, dirigido a analizar el impacto de las actividades antropogénicas en la calidad del agua de esta reserva, clasificada también como sitio RAMSAR.

Por otra parte, un monitoreo también puede tener como objetivo el proveer información precisa sobre la evaluación de la presencia de un contaminante de emergente preocupación (anteriormente denominados contaminantes emergentes) en agua potable o de cómo eliminar estos contaminantes a través de los procesos que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento de agua potable (Glassmeyer *et al.*, 2017).

Otro objetivo pudiera estar relacionado con proveer información útil para el manejo de un ecosistema. Por ejemplo, a partir del estudio de la calidad del agua en ecosistemas dulceacuícolas de la Reserva de

Biosfera Sierra del Rosario, Cuba (Arpajón *et al.*, 2012; Larrea *et al.*, 2013), se determinó incluir en el Plan de Manejo de esta Reserva, la evaluación de la calidad química y microbiológica de ecosistemas dulceacuícolas de esta área. Por otra parte, la optimización de un programa de monitoreo de la calidad de agua, que implique la evaluación e identificación de las estaciones de muestreo apropiadas, puede ser también un objetivo de estudio (Camara *et al.*, 2019).

Descripción del área de estudio

Para la descripción del área de estudio se debe considerar: la extensión del área, las condiciones ambientales y procesos (incluyendo actividades antropogénicas) que afectan la calidad del agua, la información meteorológica e hidrológica del sitio de estudio, la descripción de los cuerpos de agua a monitorear (arroyos, afluentes, lagos, acuíferos, aguas subterráneas) y los usos actuales y potenciales del agua (W.M.O., 2013; Behmel *et al.*, 2016; Alilou *et al.*, 2018).

En el caso de que no existan antecedentes sobre el área de estudio y las condiciones ambientales y procesos que afectan la calidad del agua, se debe realizar un reconocimiento del área y un estudio preliminar para la selección de las estaciones de muestreo que tenga en cuenta: composición de las rocas, vegetación terrestre y acuática, vida salvaje, clima, distancia a partir de cuerpos de agua salada, actividades antropogénicas, color y olor del agua, presencia de residuos, etc. (Bartram and Ballance, 1996; W.M.O., 2013). Este estudio preliminar debe ser de corta duración y contribuye a refinar los aspectos logísticos del monitoreo, lo que a su vez tributa a economizar los recursos, ya que a partir del mismo se puede determinar si se necesitan más o menos estaciones de muestreo; lo que permite ganar en conocimiento sobre la calidad del agua de varios puntos en el ecosistema.

Un ejemplo concreto de diseño experimental donde se incluye un estudio preliminar se puede encontrar en el trabajo de Glassmeyer *et al.*, (2017), donde se evalúa la presencia de diferentes contaminantes de emergente preocupación. En este estudio, se analizan inicialmente durante un año, las muestras de agua procedentes de nueve plantas de tratamiento de agua potable a partir de ocho estados de los Estados Unidos y 84 químicos, lo que permitió optimizar el diseño experimental, los protocolos de muestreo en campo y los métodos analíticos utilizados para la determinación de los contaminantes. Una vez puesto a punto el diseño experimental, se incrementaron las estaciones de muestreo al igual que el número de contaminantes a determinar.

Sin embargo, no necesariamente el estudio preliminar debe tener una duración de un año, ya que es posible realizar un único muestreo en varias estaciones de muestreo utilizando diferentes indicadores y obtener información robusta sobre la calidad del cuerpo de agua (Souza Beghelli *et al.*, 2016). Esto a su vez, permitirá reducir los costos del estudio preliminar. No obstante, a la hora de implementar el monitoreo de la calidad de agua debe considerarse la variabilidad espacial y temporal del ecosistema.

Selección de las estaciones de muestreo

La selección de las estaciones de muestreo dependerá de los objetivos del monitoreo, la morfología e hidrodinámica del cuerpo de agua, fuentes contaminantes (puntuales y no puntuales) y de los recursos disponibles (Bazán *et al.*, 2014). Según el tipo de fuente de agua, se deben considerar como criterios de selección: la ubicación de las fuentes contaminantes (vertimientos de aguas residuales industriales y domésticas, terrenos agrícolas, vertederos de residuos sólidos, etc.), la accesibilidad a los puntos de muestreo (rápido y seguro) y la representatividad, es decir que el punto de muestreo deber ser ubicado en un lugar que presente un flujo regular y de ser posible permita tener una referencia para su futura ubicación (Bartram and Ballance, 1996; W.M.O., 2013).

Particularmente en ríos y quebradas, debe ubicarse un punto de monitoreo aguas arriba, que generalmente se inicia en la cabecera de la cuenca, el cual servirá como punto de referencia (Awoke *et al.*, 2016). Además, los puntos de monitoreo deben ser ubicados aguas arriba y aguas abajo de una descarga de agua residual. También se deben ubicar estaciones de muestreo en los afluentes del río y a aproximadamente 100 m de distancia del punto de unión del afluente con el cauce principal (Awoke *et al.*, 2016). Esto último permite analizar el impacto del afluente en la calidad del agua de la corriente principal. Los puntos de muestreo deben ser georeferenciados para facilitar su posterior localización.

El número de estaciones de muestreo dependerá de las características del ecosistema acuático (morfología, hidrodinámica, fuentes contaminantes, etc.). Sin embargo, después de un estudio preliminar,

el monitoreo de la calidad de agua puede ser refinado incrementando o disminuyendo el número de estaciones de muestreo (Glassmeyer *et al.*, 2017; Tavakol *et al.*, 2017; Camara *et al.*, 2019). Mediante el empleo de análisis multivariado, las estaciones de muestreo con características similares pueden agruparse y luego seleccionar una representación de cada grupo, lo cual contribuirá a disminuir los costos del monitoreo.

Frecuencia y periodo de monitoreo

De acuerdo a las características del ecosistema y al objetivo del monitoreo se establece la frecuencia de monitoreo. Para la frecuencia de muestreo, si lo que se desea conocer, son las características de la calidad del agua por un largo periodo de tiempo, una frecuencia mensual o bimensual es aceptable. Si por el contrario, el objetivo del monitoreo es controlar la calidad del agua (ej: fuente de agua potable), se deben realizar muestreos semanales. En caso de que se sospeche o se detecten variaciones significativas de la calidad del agua en una estación de muestreo, deben tomarse muestras puntuales diarias o muestras compuestas (Bartram and Ballance, 1996; APHA, 2012). Debe tenerse el cuidado de siempre muestrear a la misma hora del día y tomar en consideración la influencia de las mareas en el caso de estaciones estuarinas, así como los periodos poco lluviosos y lluviosos, donde puede existir sequía o inundaciones en el ecosistema.

Con respecto al periodo de monitoreo, este dependerá del cuerpo de agua y sus características específicas, por ejemplo, en Cuba existen dos estaciones marcadas: periodo lluvioso (mayo-octubre) y periodo poco lluvioso (noviembre-abril), por lo que se deben tener en cuenta estos periodos a la hora de llevar a cabo un monitoreo de la calidad de agua. Algunos ecosistemas acuáticos se consideran intermitentes, debido a que su curso o parte del mismo se seca durante los periodos poco lluviosos. Esta característica, debe tenerse en cuenta a la hora de establecer el periodo y la frecuencia de muestreo. De igual forma, en aquellas regiones donde existan marcadas diferencias entre las estaciones del año, estas deben ser consideradas. Por ejemplo, Atiq *et al.* (2015) muestrearon el río Balu en la India, durante los periodos de monzón y periodos de no-monzón, observando diferencias significativas entre ambas estaciones. De igual forma, Rashid y Romshoo (2013) tomaron muestras del río Lidder en el Himalaya de Cachemira durante las cuatro estaciones (primavera, verano, otoño e invierno), apreciando el impacto de las actividades antropogénicas, particularmente en los meses de verano.

Para lograr una buena representatividad en el muestreo y que luego se puedan brindar conclusiones válidas sobre la calidad de un ecosistema acuático, se deben realizar análisis espaciales y temporales a lo largo del ecosistema, lo que permitirá evaluar los parámetros de calidad de agua más significativos, teniendo en cuenta las actividades que puedan afectar la salud del ecosistema acuático y los principales contaminantes presentes, de acuerdo a las actividades que se realicen (ej: agrícola, industrial, recreativas, etc.)(Juahir *et al.*, 2011; Buckalew *et al.*, 2015).

Indicadores de calidad de agua

Los indicadores que se seleccionen para el monitoreo, dependerán de los objetivos del mismo y de los usos del agua (agua potable, irrigación, cría de animales, uso industrial, uso recreativo, etc.). También depende de las normas vigentes en cada país en el que se realiza la evaluación de la calidad del agua. Para tener una idea rápida y general de cómo se encuentra la calidad de un ecosistema, se sugiere utilizar los indicadores: temperatura, conductividad eléctrica (CE), pH, oxígeno disuelto (OD) y sólidos totales disueltos (STD) (Silva *et al.*, 2011; W.M.O., 2013; Souza Beghelli *et al.*, 2016; Panikkar *et al.*, 2022), los cuales se pueden determinar *in situ* mediante el uso de un multímetro. En muchos casos se emplean sistemas multisensores que permiten realizar un registro diario y continuo de estos indicadores y por tanto, de la calidad de diferentes ecosistemas acuáticos (Silva *et al.*, 2011). El uso de estos indicadores tiene como ventaja, que se pueden medir *in situ*, son poco costosos, eficientes y pueden servir como alerta de contaminación.

En diferentes programas de monitoreo, la existencia de una fuente contaminante, constituye una razón importante para la selección de los indicadores de calidad de agua (Tavakol *et al.*, 2017). En caso de que se conozca la existencia de algún tipo de contaminación, por ejemplo contaminación por desechos orgánicos, se deben determinar los indicadores: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda

Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), nitrógeno orgánico disuelto, fósforo total, coliformes termotolerantes (CTE) y *Escherichia coli* (Samboni *et al.*, 2007; APHA, 2012).

Si se está en presencia de la eutrofización de un cuerpo de agua, como resultado de descargas puntuales o debido al arrastre o drenaje a partir de suelos dedicados a la agricultura, se deben determinar los indicadores: nitratos (NO₃-N), nitritos (NO₂-N), amonio (NH₄-N), fósforo total, transparencia y clorofila *a* (Samboni *et al.*, 2007; APHA, 2012). En cambio, para aguas dedicadas a la agricultura e irrigación se sugieren los indicadores: STD, boro, selenio, sodio, calcio, magnesio, CTE, *E. coli* y además se debe llevar un control de los pesticidas y herbicidas que se utilizan (Bartram and Ballance, 1996; APHA, 2012).

Para aguas residuales procedentes de efluentes industriales, se sugieren los indicadores: STD, DBO, DQO, trihalometanos, hidrocarburos aromáticos, fenoles, cianuro, benceno, arsénico, cadmio, cobre, plomo, manganeso, mercurio y zinc. La selección de los indicadores está en dependencia de los procesos industriales que se lleven a cabo en las industrias que se localizan cerca del ecosistema en estudio.

Cuando se evalúa el proceso de recuperación ambiental (por ejemplo, un monitoreo de impacto) se deben determinar indicadores fisicoquímicos (temperatura, pH, OD, CE, nutrientes, DQO, DBO, clorofila *a*), indicadores bacterianos de contaminación fecal (*E. coli*, enterococos, coliformes termotolerantes) y se deben realizar estudios sobre comunidades de organismos (peces, macroinvertebrados, composición de comunidades bacterianas, etc.) que permitan analizar su respuesta a un determinado impacto (Lear *et al.*, 2012; Baptista and Santos, 2015; Awoke *et al.*, 2016; Souza Beghelli *et al.*, 2016; Kebede *et al.*, 2020; Larrea *et al.*, 2020; Bedoya *et al.*, 2022).

La determinación de los indicadores sugeridos para cada situación, se incluyen en diferentes guías como la guía para la calidad del agua recreativa canadiense (Health Canada, 2012), la guía para la calidad del agua potable (W.H.O, 2017), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2017) y las directrices cubanas para el agua potable (Norma Cubana 827, 2012; Norma Cubana 1021, 2014). Estas pautas son esenciales para verificar la calidad de un cuerpo de agua. Particularmente en Cuba, se debe actualizar la norma de calidad agua para lugares de baño en costas y en masas de aguas interiores (Norma Cubana 22, 1999) de la misma forma que lo hicieron las normas cubanas para el agua potable, teniendo en cuenta que los coliformes totales no se utilizan para la evaluación de la calidad de agua y que para la determinación de los indicadores bacterianos de contaminación fecal también puede utilizarse la técnica de filtración por membrana.

3.6. Análisis estadísticos a los datos del monitoreo

El empleo de métodos estadísticos multivariados para el análisis de los datos del monitoreo constituye una herramienta útil para evitar malas interpretaciones que puedan surgir del análisis de datos aislados (Juahir *et al.*, 2011). Estos métodos se han empleado con anterioridad para caracterizar y evaluar la calidad del agua de diferentes ecosistemas acuáticos. Entre los métodos multivariados más utilizados, se encuentran: el análisis jerárquico de conglomerado, el análisis discriminante (DA) y el análisis de componentes principales (PCA) (Juahir *et al.*, 2011; Manoj and Padhy, 2014), los cuales permiten entender mejor los resultados y reducir la subjetividad en los procesos (Lusiana *et al.*, 2022)

Para el análisis jerárquico de conglomerado, el empleo del método de Ward utilizando distancias euclidianas como medida de similitud entre las estaciones de muestreo constituye un método muy eficiente (Manoj and Padhy, 2014). Aplicando el análisis de conglomerado a un estudio preliminar de la calidad del agua de diferentes estaciones de muestreo a lo largo de un ecosistema acuático, puede contribuir a la reducción de las estaciones de muestreo, si se obtienen grupos/conglomerados con diferentes características, por ejemplo, estaciones con bajo, medio y alto grado de contaminación (Juahir *et al.*, 2011). Un ejemplo concreto se puede apreciar en la Figura 1, donde a partir del monitoreo preliminar de 14 estaciones de muestreo en el río Almendares (La Habana, Cuba), aplicando el análisis de conglomerado se pudo reducir la cantidad de estaciones a tres (Río Cristal, Paila y Puente de Hierro), que presentaron bajo, alto y moderado nivel de contaminación. De esta forma se evidencia que el monitoreo de estas tres estaciones de muestreo es suficiente para representar tres regiones diferentes (en cuanto a calidad del agua) en el río Almendares.

En el caso del análisis discriminante, este determina las variables que discriminan entre dos o más grupos/conglomerados, lo cual permite analizar las variables más significativas que influyen en la separación espacial de los grupos (estaciones de muestreo) y eliminar aquellas variables no significativas

(Juahir *et al.*, 2011; Manoj and Padhy, 2014; Gholizadeh *et al.*, 2016). En cuanto al análisis de componentes principales, este brinda información acerca de los parámetros más significativos debido a variaciones espaciales y temporales que describen el total de los datos. Mediante este análisis se excluyen los parámetros menos significativos con un mínimo de pérdida de información original (Olsen *et al.*, 2012; Manoj and Padhy, 2014; Lever *et al.*, 2017). Un ejemplo, se puede apreciar en el trabajo de Arpajón *et al.*(2011), quienes a través de un análisis de componentes principales detectaron que las concentraciones de nutrientes (nitratos, nitritos, amonio y fosfatos) y de bacterias heterótrofas totales permiten separar las estaciones del río Almendares en tres grupos (alto, medio y bajo) de acuerdo al nivel de contaminación.

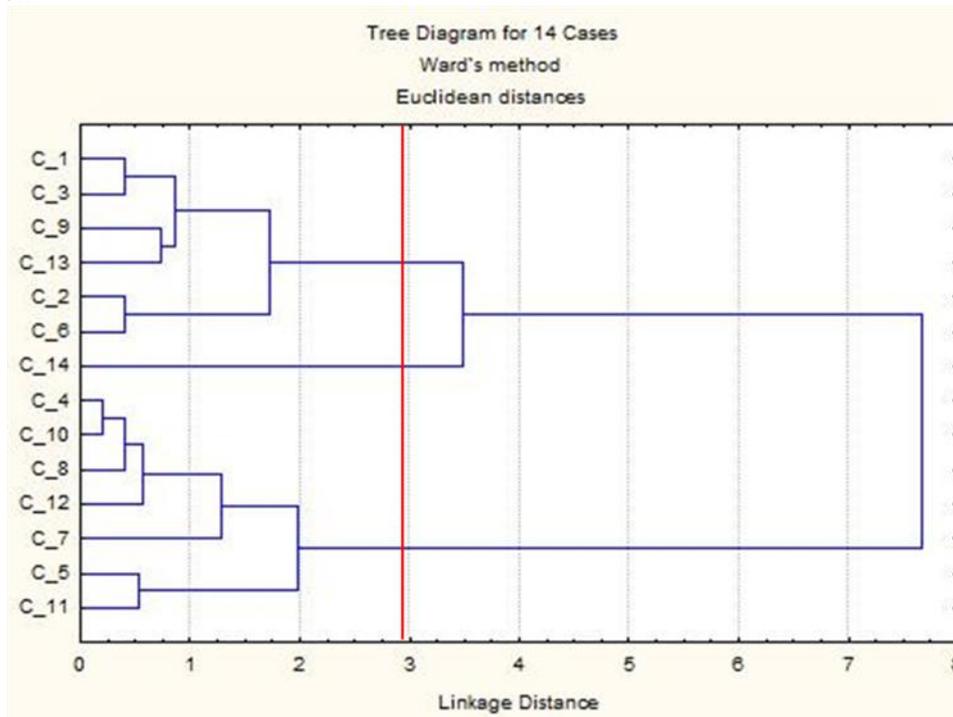


Fig. 1. Análisis de conglomerado para la selección de las estaciones de muestreo. La línea roja indica a la distancia que se realizó el corte (70%). Para esta distancia se forman tres grupos para un nivel de confianza del 100%. Estaciones de muestreo: C_1: Puente de Hierro; C_2: Puente de Piedra; C_3: Puente Avenida 23; C_4: Puentes Grandes; C_5: Mordazo; C_6: Puentes Grandes Avenida 51; C_7: Santoyo; C_8: Santoyo 1; C_9: Santoyo 2; C_10: Puente 100 y Boyeros; C_11: Paila; C_12: Fabrica de Helados Coopelia; C_13: Maria del Carmen; C_14: Río Cristal.

Comunicación de los resultados. Índices de calidad de agua

Los índices de calidad permiten predecir cambios y características en la calidad del agua mediante la consideración de múltiples parámetros (Juahir *et al.*, 2011). Estos índices surgen como una herramienta simple para evaluar la calidad de los recursos hídricos, fundamental en procesos decisivos de políticas públicas y en el seguimiento de sus impactos (Torres *et al.*, 2009; Mahapatra *et al.*, 2012). Según Ruiz (2017) para que un índice sea considerado útil debe cumplir ciertos criterios:

1. Discriminar los cambios inducidos por nutrientes, efectos estacionales y climáticos
2. Ser sensible a varios niveles de enriquecimiento
3. Ser geográficamente generalizados
4. Ser aplicable a largo plazo y su metodología debe ser sencilla

Los índices de calidad del agua tienen como objetivo fundamental evaluar la calidad del agua para diferentes usos, por lo cual es calculado a partir de indicadores físico-químicos y microbiológicos de contaminación directamente relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua (Torres *et al.*, 2009; Yisa and Jimoh, 2010; Mahapatra *et al.*, 2012; Lusiana *et al.*, 2022; Panikkar *et al.*, 2022). El índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o incluso un color (Torres *et al.*, 2009). El desarrollo de los índices del nivel trófico en ecosistemas acuáticos no están encaminados a un interés académico, sino a simplificar la interpretación de los datos de su monitoreo y, de esta forma, comunicar la información de la calidad del agua de una forma fácil a la población y a los gestores ambientales (Yisa and Jimoh, 2010; Rocha *et al.*, 2015; Ruiz, 2017).

Para calcular el índice de calidad de las aguas Dunnette (1979) recomienda seleccionar parámetros que respondan a cinco categorías reconocidas: nivel de oxígeno (Oxígeno disuelto, DQO, DBO), eutrofización (nutrientes, clorofila *a*), aspectos de salud (indicadores bacterianos de contaminación fecal), características físicas (temperatura, color) y sustancias disueltas (STD). Estas cinco categorías permiten caracterizar de forma global la calidad y el estado de salud de ecosistemas dulceacuícolas. Existen diferentes índices de calidad de agua como son: el Índice de Calidad de Agua del Consejo Canadiense de Ministros del Ambiente (CCME WQI, siglas en inglés), el Índice de la Fundación Nacional de Salud (NSF, siglas en inglés), el Índice de Oregón, el Índice de Bascarón, el Índice de Casa, entre otros (ver Sutadian *et al.*, (2016), para ampliar sobre índices de calidad de agua y sus usos). De todos estos, el más empleado es el CCME WQI, debido a que es flexible en cuanto al empleo de los parámetros a seleccionar, lo cual permite hacer modificaciones de acuerdo a las condiciones locales del ecosistema a analizar (Sutadian *et al.*, 2016; Maansi *et al.*, 2022). Teniendo en cuenta estos aspectos, los índices de calidad del agua se convierten en una medida importante para la evaluación y el manejo de las aguas superficiales.

MONITOREO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEL RÍO ALMENDARES

El río Almendares se localiza en la provincia de La Habana, Cuba. Constituye la corriente principal de la Cuenca Almendares-Vento (402 km²), con 49.8 km de longitud. La cuenca hidrográfica Almendares-Vento es la corriente superficial más importante de La Habana desde el punto de vista económico, social, de salud, cultural, recreativo y urbanístico. A lo largo de su recorrido se asientan grandes parques científico-recreativos como son los Jardines Botánico y Zoológico, así como las viviendas de más de medio millón de personas (Peralta *et al.*, 2005). Al final de su recorrido se encuentra el Parque Metropolitano de La Habana, complejo socio-ecológico-cultural dedicado a la recreación de la población. En este centro, las aguas del río constituyen el centro recreativo fundamental, de ahí que el monitoreo de la calidad de esta agua resulte de vital importancia, a fin de garantizar la salud de los que disfrutan de ella (Domínguez *et al.*, 2012). Sus aguas se utilizan, además, para la agricultura, la pesca y la industria (Arpajón *et al.*, 2011). Se conoce que recibe descargas de aguas residuales de más de 240 fuentes contaminantes provenientes de diferentes sectores de la economía y la urbanización que vierten sus aguas residuales sin tratamiento o ineficientemente tratada (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, 2010; Veranes, 2013). Esto se debe, en parte, a la ausencia de una infraestructura sanitaria adecuada y a una insuficiente cobertura de saneamiento de las aguas residuales domésticas e industriales (Veranes, 2013; de Freitas and Westbrook, 2016). Actualmente el río Almendares es prácticamente una corriente anaeróbica a la cual se le continúan incorporando residuales domésticos crudos provenientes de las barriadas colindantes a las márgenes (Peralta *et al.*, 2005; de Freitas and Westbrook, 2016). Además, producto del desarrollo de la actividad pesquera en el estuario existen objetos enterrados parcial o totalmente en el cieno limo-arenoso como restos de embarcaciones de madera o plástico y pilotes de antiguos muelles (Vega *et al.*, 2007). También ingresan al cauce principal del río cuatro arroyos: Paila, Marinero, Mordazo y Santoyo; aportando una carga contaminante adicional (Domínguez *et al.*, 2012).

En el río Almendares se ha evaluado de forma sistemática la calidad del agua desde el año 2003, donde se ha verificado que las aguas de este río no son apropiadas para la recreación, para la pesca o para uso agrícola (Olivares-Rieumont *et al.*, 2005; Chiroles *et al.*, 2007; García-Armisen *et al.*, 2007; Prats *et al.*, 2008; Arpajón *et al.*, 2011; Romeu *et al.*, 2015; Izquierdo *et al.*, 2020; Larrea *et al.*, 2020; Barroso *et al.*, 2021) a pesar de las medidas de saneamiento y gestión ambiental que se han desarrollado en los últimos 15 años.

Como parte del monitoreo que se ha llevado a cabo en este ecosistema, inicialmente se realizaron estudios preliminares con el objetivo de contar con una referencia acerca de los niveles de contaminación química y microbiológica de las aguas y sedimentos del río, debido a que no se contaba con datos previos (Olivares-Rieumont *et al.*, 2005; Prats *et al.*, 2006). A partir de estos estudios, se seleccionaron las estaciones de muestreo y los indicadores de calidad de agua a determinar, haciendo un mejor uso de los recursos disponibles para realizar el monitoreo de la calidad de las aguas del río Almendares.

En los estudios preliminares realizados por Olivares-Rieumont *et al.* (2005) y Prats *et al.* (2006), se seleccionaron 14 estaciones de muestreo que incluían puntos en la corriente principal del río y en los tributarios. Además, para la ubicación de estas estaciones se tuvieron en cuenta, la presencia de diferentes fuentes puntuales y no puntuales de contaminación, que incluían: fábricas, industrias, un vertedero de residuos sólidos, así como tierras dedicadas a la actividad agrícola. Posteriormente y atendiendo a similitudes en cuanto a la calidad del agua de algunas estaciones, estas se redujeron a nueve estaciones de muestreo (Arpajón *et al.*, 2011; Knapp *et al.*, 2012). En los estudios de Larrea *et al.* (2020) sólo se muestrean tres de las nueve estaciones de muestreo seleccionadas en el río Almendares, atendiendo al objetivo de realizar un monitoreo de impacto para analizar como los contaminantes de este ecosistema afectan la estructura de la comunidad bacteriana. Estas tres estaciones presentan diferentes niveles de contaminación (alto, medio y bajo) y son representativas de la calidad del agua a lo largo del río Almendares.

Para los muestreos de las aguas de este ecosistema, se han tomado en consideración los periodos poco lluviosos y periodos lluviosos, estableciéndose comparaciones entre ambas estaciones (Prats *et al.*, 2006; Knapp *et al.*, 2012; Romeu *et al.*, 2015). Por lo general, los muestreos han tenido una frecuencia bimensual dentro de cada época del

año; aunque en ocasiones se han realizado muestreos puntuales o con una frecuencia quincenal en función del objetivo del estudio (Olivares-Rieumont *et al.*, 2005; Knapp *et al.*, 2012).

En el río Almendares, atendiendo a las diferentes fuentes contaminantes, se han utilizado como indicadores de calidad de agua la temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, DBO, DQO, nitrato, nitrito, amonio, fosfato, hidrocarburos aromáticos, arsénico, cadmio, cobre, plomo, manganeso, mercurio, zinc, clorofila *a*, coliformes termotolerantes, *Escherichia coli* y enterococos (Lima *et al.*, 2005; Olivares-Rieumont *et al.*, 2005; Prats *et al.*, 2006; Arpajón *et al.*, 2011; Santana-Romero *et al.*, 2012; Larrea *et al.*, 2020). Además para determinar el impacto de los contaminantes sobre la ecología del río, se han estudiado las comunidades bacterianas (Larrea *et al.*, 2020), la actividad proteolítica extracelular (Izquierdo *et al.*, 2020) y la presencia de genes de resistencia a antibióticos (Graham *et al.*, 2011; Knapp *et al.*, 2012).

Entre los contaminantes directamente identificados en el cuerpo de agua del río Almendares se encuentran diversas especies metálicas como plomo y zinc en concentraciones superiores a los límites máximos permitidos según las normas internacionales de calidad del agua y sedimentos, así como antibióticos (Olivares-Rieumont *et al.*, 2005; Veranes, 2013). Además, se han obtenido concentraciones elevadas de contaminantes químicos como compuestos orgánicos (Santana-Romero *et al.*, 2012) y nutrientes inorgánicos como amonio, nitrito, nitrato y fosfato (Larrea *et al.*, 2020). Asimismo, se han detectado altas concentraciones de los indicadores de contaminación fecal *E. coli*, coliformes termotolerantes y enterococos (Romeu *et al.*, 2015; Izquierdo *et al.*, 2020; Larrea *et al.*, 2020). Estos resultados son una evidencia del deterioro de la calidad de las aguas del río Almendares.

A pesar de que se cuenta con información acerca del comportamiento de diferentes indicadores de calidad de agua en el río Almendares, no se ha utilizado con anterioridad un índice de calidad de agua, que permitiría resumir todos los datos colectados y que facilitaría la comunicación de estos resultados a los decisores de las políticas ambientales. En la actualidad, este río continúa siendo objeto de estudio de diferentes investigaciones encaminadas al mejoramiento de la calidad de sus aguas.

CONCLUSIONES

El diseño e implementación de un monitoreo de calidad de agua, resulta complejo y costoso. Es por esto que la realización de un estudio preliminar que permita conocer las características del ecosistema, contribuye no solo a la selección de las estaciones de muestreo, sino también de los indicadores de calidad de agua que serán determinados; todo lo cual permite refinar el monitoreo, aprovechar bien los recursos y reducir los costos. Dentro del monitoreo, el empleo de un índice de calidad de agua y de métodos estadísticos multivariados, constituyen herramientas útiles que facilitan la comunicación de los resultados a los gestores ambientales; por lo que se recomienda su empleo en la evaluación de la calidad del agua de ecosistemas acuáticos como el río Almendares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alilou, H., Nia, A. M., Keshtkar, H., Han, D. and Bray, M. (2018). A cost-effective and efficient framework to determine water quality monitoring network locations. *Science of The Total Environment*, 624 283-293.
- Anitha, M. and Ravikumar, S. (2014). Assessment of physiochemical and microbial concentrations in different freshwaters in Tiruchirappalli city: A special emphasize on their correlation. *International Journal of Advances in Pharmaceutical Analysis*, 4(2), 88-95.
- APHA. (2012). *Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater*. In American Public Health Association, A. W. W. A., and Water Environment Federation. (Ed.), (22nd ed.).
- Arpajón, Y., Larrea, J., Rojas, N., Heydrich, M. and Lugo, D. (2012). Efectividad de los programas de preservación de ecosistemas dulceacuícolas de la Sierra del Rosario, Pinar del Río. *Memorias Convención Internacional de Salud Pública*. Retrieved from
- Arpajón, Y., Romeu, B., Rodríguez, A., Heydrich, M., Rojas, N. and Lugo, D. (2011). Impacto de los nutrientes inorgánicos sobre la comunidad bacteriana del río Almendares (Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 11, 731-738.
- Atiq, A. R., Rahaman, M. M., Sojib, R. M. and Shil, S. C. (2015). Water Quality Changes in Balu River during Non-Monsoon and Monsoon Period. *Journal of Water Resource Engineering and Management*, 2(3), 38-49.

- Awoke, A., Beyene, A., Kloos, H., Goethals, P. L. M. and Triest, L. (2016). River water pollution status and water policy scenario in Ethiopia: raising awareness for better implementation in developing countries. *Environmental Management*, 58 (4), 694-706. doi: 10.1007/s00267-016-0734-y
- Baptista, C. and Santos, L. (2015). Water quality monitoring in the Paul do Boquilobo Biosphere Reserve. *Physics and Chemistry of the Earth*. doi: 10.1016/j.pce.2015.11.008.
- Barroso, P., Bocourt, L., Lugo, D. and Romeu, B. (2021). Detección de β -lactamasas de espectro extendido en *Escherichia coli* aisladas de ecosistemas dulceacuícolas de La Habana. *Revista Cubana de Medicina Tropical*, 73(2), e577.
- Bartram, J. and Ballance, R. (Eds.). (1996). *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes.*: CRC Press.
- Bazán, R., Larrosa, N., Bonansea, M., López, A., Busso, F. and Cosavella, A. (2014). Programa de monitoreo de calidad de agua del Embalse Los Molinos, Córdoba - Argentina. *REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES*, 1(2), 1-8.
- Bedoya, K., Galeano, L., Hincapié, M. M., Mesa, J. A. and Alzate, J. F. (2022). Bacterial diversity analysis of freshwater sources for human use in rural areas of the tropical Andean region of Colombia. *Infectio*, 26(1), 11-18.
- Behmel, S., Damour, M., Ludwig, R. and Rodriguez, M. J. (2016). Water quality monitoring strategies — A review and future perspectives. *Science of The Total Environment*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235>
- Buckalew, D. W., Tuono, A. J., Simmons, A. K., Lankford, T. W. and Smith, D. H. (2015). Homogeneous distribution of *Escherichia coli* measured within the vertical water column of small, freshwater streams. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 410-421.
- Camara, M., Jamil, N. R., Abdullah, A. F. B. and Hashim, R. B. (2019). Spatiotemporal assessment of water quality monitoring network in a tropical river. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 729.
- Crocker, J. and Bartram, J. (2014). Comparison and cost analysis of drinking water quality monitoring requirements versus practice in seven developing countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 7333-7346.
- Chiroles, S., González, M. I., Torres, T., Valdés, M. and Domínguez, I. (2007). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en aguas del río Almendares (Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 7, 222-227.
- de Freitas, N. S. and Westbrook, A. (2016). Havana's wastewater treatment plants: changes over time and estimate of replacement cost. *Cuba in Transition*, 26, 160-171.
- Domínguez, J., Borroto, J., Pérez, E. and Martínez, A. (2012). Determinación de parámetros del modelo de calidad de agua del Río Almendares. VII Taller de Medio Ambiente [revista en internet], 1-7.
- Dunnette, D. (1979). A Geographically Variable Water Quality Index Used In Oregon. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 51, 53-61.
- García-Armisen, T., Prats, J. and Servais, P. (2007). Comparison of culturable fecal coliforms and *Escherichia coli* enumeration in freshwaters. *Canadian Journal of Microbiology*, 53, 798-801.
- Garda, C., Castleden, H. and Conrad, C. (2017). Monitoring, Restoration, and SourceWater Protection: Canadian Community-Based Environmental Organizations' Efforts towards Improving Aquatic Ecosystem Health. *Water*, 9, 212-234.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M. and Reddi, L. (2016). Discriminant analysis application in spatiotemporal evaluation of water quality in South Florida. [ss]. *Journal of Hydroinformatics*, 18.6, 1019-1032.
- Glassmeyer, S. T., Furlong, E. T., Kolpin, D., Batt, A. L., Benson, R., Boone, J. S., Conerly, O., Donohue, M. J., King, D. N., Kostich, M. S., Mash, H. E., Pfaller, S. L., Schenck, K. M., Simmons, J. E., Varughese, E. A., Vesper, S. J., Villegas, E. N. and Wilson, V. S. (2017). Nationwide reconnaissance of contaminants of emerging concern in source and treated drinking waters of the United States. *Science of The Total Environment*, 581-582, 909-922.

- Graham, D. W., Olivares - Rieumont, S., Knapp, C. W., Lima, L., Werner, D. and Bowen, E. (2011). Antibiotic Resistance Gene Abundances Associated with Waste Discharges to the Almendares River near Havana, Cuba. *Environ. Sci. Technol.*, 45, 418–424.
- Health Canada. (2012). Guidelines for Canadian Recreational Water Quality, Third Edition. Water, Air and Climate Change Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada. Ottawa, Ontario. (Catalogue No H129-15/2012E).
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. (2010). Informe técnico Cuencas Hidrográficas de La Habana: Situación del saneamiento ambiental La Habana, Cuba.
- Izquierdo, K., Larrea, J. A., Lugo, D. and Rojas, M. M. (2020). Proteolytic enzyme activity and its relationship with physicochemical and microbiological indicators in freshwater ecosystems of western Cuba. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231, 1-15. doi: 10.1007/s11270-020-04909-z
- Juahir, H., Zain, S. M., Kamil, M., Hanidza, T. I. T., Armi, A. S. M., Ekhwan, M. and Mazlin, T. (2011). Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environment Monitoring and Assessment*, 173, 625-641.
- Kebede, G., Mushi, D., Linke, R. B., Dereje, O., Lakew, A., Hayes, D. S., Farnleitner, A. H. and Gra, W. (2020). Macroinvertebrate indices versus microbial fecal pollution characteristics for water quality monitoring reveals contrasting results for an Ethiopian river. *Ecological Indicators*, 108, 105733. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105733>
- Knapp, C. W., Lima, L., Olivares-Rieumont, S., Bowen, E., Werner, D. and Graham, D. W. (2012). Seasonal variations in antibiotic resistance gene transport in the Almendares River, Havana, Cuba. *Frontiers in Microbiology*, 3, 1-11.
- Larrea, J. A., Heydrich, M., Romeu, B., Lugo, D., Mahillon, J. and Rojas, M. M. (2020). Bacterial community structure of Almendares and San Juan rivers. Relationship with water quality. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 8(2), 1-14.
- Larrea, J. A., Rojas, M. M., Lugo, D. and Heydrich, M. (2013). Behaviour of fecal contamination indicators in waters of the Tourist Complex “Las Terrazas”, Pinar del Río, Cuba. In Farfán, H., Corvea, J. L., Bustamante, I. D. and LaMoreaus, J. W. (Eds.), *Management of Water Resources in Protected Areas* (pp. 263-270). 1st Ed. New York/ Heidelberg.
- Lear, G., Dopheide, A., Ancion, P., Roberts, K., Washington, V., Smith, J. and et al. (2012). Biofilms in freshwater: their importance for the maintenance and monitoring of freshwater health. In Lear, G. and Lewis, G. D. (Eds.), *Microbial Biofilms: Current Research and Applications* (pp. 129-151): Caister Academic Press, Norfolk, UK.
- Lever, J., Krzywinski, M. and Altman, N. (2017). Principal component analysis. *Nature Methods*, 14(7), 641-642.
- Lima, L., Olivares, S., Columbie, I., Madera, D. R. and Gil, R. (2005). Niveles de plomo, Zinc, Cadmio y Cobre en el río Almendares, Ciudad de La Habana, Cuba. . *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21(003), 115-124.
- Lusiana, E. D., Mahmudi, M., Hutahaean, S. M., Darmawan, A., Buwono, N. R., Arsad, S. and Musa, M. (2022). A Multivariate Technique to Develop Hybrid Water Quality Index of the Bengawan Solo River, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 23(2), 123-131. doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/144420>
- Maansi, Jindal, R. and Wats, M. (2022). Evaluation of surface water quality using water quality indices (WQIs) in Lake Sukhna, Chandigarh, India. *Applied Water Science*, 12, 2. doi: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01534-x>
- Mahapatra, S. S., Sahu, M., Patel, R. K. and Panda, B. N. (2012). Prediction of Water Quality Using Principal Component Analysis. *Water Quality, Exposure and Health*, 4(2), 93-104. doi: 10.1007/s12403-012-0068-9
- Manoj, K. and Padhy, P. K. (2014). Multivariate statistical techniques and water quality assessment: Discourse and review on some analytical models. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 5(3), 607-626.
- Nhiwatiwa, T., Dalu, T. and Sithole, T. (2017). Assessment of river quality in a subtropical Austral river system: a combined approach using benthic diatoms and macro-invertebrates. *Appl. Water Sci.*, 7(8), 4785-4792. doi: <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0599-0>

- Norma Cubana 22. (1999). NC 22: Lugares de baño en costas y en masas de aguas interiores. Requisitos higiénicos sanitarios. Cuba.
- Norma Cubana 827. (2012). NC 827: Agua potable-Requisitos sanitarios. Cuba.
- Norma Cubana 1021. (2014). NC 1021: Higiene Comunal-Fuentes de abastecimiento de agua-Calidad y protección sanitaria. Cuba.
- Olivares-Rieumont, S., De La Rosa, D., Lima, L., Graham, D. W., D'Alessandro, K., Borroto, J., M., Martínez, F. and Sánchez, J. (2005). Assessment of heavy metal levels in Almendares river sediments - Havana City, Cuba. *Water Research*, 39, 3945-3953.
- Olsen, R. L., Chappell, R. W. and Loftis, J. C. (2012). Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis - literature review and Illinois River watershed case study. *Water Research*, 46(9), 3110-3122. doi: 10.1016/j.watres.2012.03.028
- Panikkar, P., Saha, A., Prusty, A. K., Sarkar, U. K. and Das, B. K. (2022). Assessing hydrogeochemistry, water quality index (WQI), and seasonal pattern of plankton community in different small and medium reservoirs of Karnataka, India. *Arabian Journal of Geoscience*, 15, 82. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09291-6>
- Peletz, R., Kumpel, E., Bonham, M., Rahman, Z. and Khush, R. (2016). To What Extent is Drinking Water Tested in Sub-Saharan Africa? A Comparative Analysis of Regulated Water Quality Monitoring International Journal of Environmental Research and Public Health, 13. doi: 10.3390/ijerph13030275
- Peralta, J. L., Gil, R., Leyva, D., Molerio, L. and Pin, M. (2005). Uso de técnicas nucleares en la evaluación de la Cuenca Almendares- Vento para la gestión sostenible de sus recursos. *Forum de Ciencia y Técnica XVI*, Actas 30-60, 1-105.
- Prats, J., Garcia-Armisen, A., Larrea, J. and Servais, P. (2008). Comparison of culture-based methods to enumerate *Escherichia coli* in tropical and temperate freshwaters. *Letters in Applied Microbiology*, 46(2).
- Prats, J., Larrea, J., García-Armisen, T., Lugo, D., Rodríguez, A., Servais, P., Rojas, N. and Heydrich, M. (2006). Potential risk due to the microbial pollution in the Almendares river, Havana Cuba. . *Contribution to the Education and Environmental Protection.*, 7, 25-34.
- Rashid, I. and Romshoo, S. (2013). Impact of anthropogenic activities on water quality of Lidder River in Kashmir Himalayas. *Environ Monit Assess*, 185, 4705-4719. doi: 10.1007/s10661-012-2898-0
- Rocha, F. C., Andrade, E. M. and Lopes, F. B. (2015). Water quality index calculated from biological, physical and chemical attributes. *Environ Monit Assess*, 187, 4163. doi: 10.1007/s10661-014-4163-1
- Romeu, B., Quintero, H., Larrea, J. A., Lugo, D., Rojas, N. and Heydrich, M. (2015). Experiencias en el monitoreo ambiental: contaminación de ecosistemas dulceacuícolas de La Habana (Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 15(3), 1325-1335.
- Ruiz, T. M. (2017). Análisis comparativo de índices de eutroficación en lagunas costeras del estado de Sonora, México. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias, La Paz, California Sur.
- Samboni, N. E., Carvajal, Y. and Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 27(3), 172-181.
- Santana-Romero, J. L., Valdés-Callado, M., Olivares-Rieumont, S. and Lima-Cazorla, L. (2012). Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos ligeros en aguas superficiales de los ríos Almendares y Luyanó en La Habana. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 43, 1-7.
- Silva, S., Hoang Nghia, N., Tiporlini, V. and Alameh, K. (2011). Web based water quality monitoring with sensor network: Employing zigbee and wimax technologies. *High capacity optical networks and enabling technologies (HONET)* (pp. 138-142).
- Souza Beghelli, F. G., Silva Lira, V., Martins Pompêo, M. L., de Lima, R., Páscoli, M. and Moschini-Carlos, V. (2016). Can a one-sampling campaign produce robust results for water quality monitoring? A case of study in Itupararanga reservoir, SP, Brazil. *Acta Limnológica Brasiliensia*, 28(e6), 1-14.

- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G. and Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—a review. *Environ Monit Assess*, 188(58), 1-29. doi: 10.1007/s10661-015-5050-0
- Tavakol, M., Arjmandi, R., Shayeghi, M., Monavari, S. M. and Karbassi, A., , . (2017). Developing an environmental water quality monitoring program for Haraz River in Northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 410.
- Torres, P., Cruz, C. H. and Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. . *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.
- USEPA. (2017). *Water Quality Standards Handbook. Chapter 3: Water Quality Criteria (Vol. EPA-823-B-17-001)*. Washington, DC. : EPA Office of Water, Office of Science and Technology.
- Vega, F., Nodal, M., López, D., Chirino, A. L., Rodríguez, R., Rondón, H., Villa, E., Valdés, N., Blanco, C., Moureo, P., Capetillo, N. and Morales, A. (2007). Estudio del impacto ambiental para el dragado del tramo del río Almendares desde Calle 23 hasta la desembocadura. *Mapping*, 136, 38-46.
- Veranes, O. (2013). Evaluación de la resistencia a antibióticos y a metales pesados en aislados bacterianos del Río Almendares. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 44(3), 35-37.
- W.H.O. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum (Vol. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO)*. Geneva.
- W.M.O. (2013). *Planning of water quality monitoring systems*. In *World Meteorological Organization. Technical Report series No. 3 (Ed.)*, (pp. 128). Geneva, Switzerland: WMO-No. 1113.
- Yisa, J. and Jimoh, T. (2010). Analytical studies on water quality index of River Landzu. *American Journal of Applied Sciences*, 7(4), 453-458.

Este artículo no presenta conflicto de intereses.