

CALIDAD SANITARIA DE LAS FUENTES HÍDRICAS DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO MANZANARES, SANTA MARTA, COLOMBIA

SANITARY QUALITY OF THE WATER SOURCES IN THE DOWNSTREAM BASIN OF THE MANZANARES RIVER, SANTA MARTA, COLOMBIA

Isaac Romero Borja, Jorge Alberto Luna Fontalvo y Wilmer Ponce Obregón

RESUMEN

Se evaluó la calidad del agua de la cuenca baja del Río Manzanares con el fin de diagnosticar su uso más factible de acuerdo a la normatividad colombiana establecida en el Decreto 3930 de 2010 (valores permisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984, transitoriamente vigente) y la Resolución 2115 de 2007. El agua de la Quebrada Donama presentó las mejores condiciones fisicoquímicas (conductividad, 76 μ S/cm; DBO, 2,8 mg/l; oxígeno disuelto, 6,52 mg/l; fósforo, 0,05 mg/l; nitratos, 0,11 mg/l) y microbiológicas (coliformes totales, 420 NMP/100ml; coliformes fecales 220, NMP/100ml). El agua de las quebradas Vira Vira, Donama, Matogiro, Chucunchaca y Río Manzanares puede ser utilizada para fines agrícolas, pecuarios y recreativos mediante contacto primario y secundario, así como para preservación de fauna y flora y mantenimiento de ecosistemas asociados; además, son susceptibles de ser tratadas para obtención de agua potable. El agua cruda (agua natural que no ha sido sometida a proceso de tratamiento para su potabilización) del corregimiento Bonda no cumple con las condiciones de color, turbiedad, concentración de nitritos y coliformes totales y fecales establecidas por la normatividad nacional vigente. Las estimaciones de DBO, DQO, nitritos, sólidos y coliformes totales y fecales son los principales factores que afectan las características del recurso hídrico, explicando en un 92% el comportamiento del sistema.

PALABRAS CLAVE: agua, parámetros fisicoquímicos, coliformes, contaminación, Río Manzanares

ABSTRACT

This work was aimed at assessing the quality of the water of the downstream basin of the Manzanares River, in order to diagnose its more feasible use according to the Colombian legislation established in Decree 3939 of 2010 (allowable values established in the Decree 1594 of 1984, in effect temporarily) and the Resolution 2115 of 2007. The water from Donama creek presented the best physicochemical (conductivity, 76 μ S/cm; BOD, 2,8 mg/l; dissolved oxygen, 6,52 mg/l, phosphorus, 0,05 mg/l; nitrate, 0.11 mg/l) and microbiological conditions (total coliforms, 420 NMP/100 ml: fecal coliforms, 220 NMP/100 ml). The water from Vira Vira, Donama, Matogiro and Chucunchaca creeks and Manzanares River can be used for agricultural, livestock and recreational (through primary and secondary contact) purposes, as well as for preservation of wildlife and associated ecosystems; moreover, these waters are suitable for drinking water production. The water supplied to the village of Bonda does not meet the conditions of color, turbidity, nitrite concentration and total and fecal coliforms established by national regulations. The estimates of BOD, COD, nitrites, solids and coliforms (total and fecal) are the main factors affecting the characteristics of the water resource, explaining 92% of the behavior of the system.

KEY WORDS: water, physicochemical parameters, coliforms, pollution, Manzanares River

INTRODUCCIÓN

El Río Manzanares, a pesar de su corta longitud de cuenca, atraviesa en su trayecto una variedad de ecosistemas, desde un bosque muy húmedo bajo y

hasta un bosque espinoso tropical, lo cual favorece ecológicamente al valle porque contribuye de forma positiva a la regulación del clima y del agua en la región (Hincapié y Atencio, 2002). El Río Manzanares representa la principal fuente de suministro de agua

Dirrección de los autores:

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Carrera 32 N° 22 - 08, San Pedro Alejandrino. Santa Marta, Magdalena, Colombia, iromero149@hotmail.com (I.R.B). Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Magdalena, jorgealbertolunafontalvo@yahoo.es (J.A.L.F). Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena. Urb. Villa Toledo Mza A C 15, Santa Marta, Magdalena, Colombia, wilponobre4@hotmail.com (W.P.O).



potable para la ciudad de Santa Marta y de agua para el riego de las zonas de cultivos ubicadas en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (Parodi et al., 1996).

La contaminación de la cuenca baja del Río Manzanares se debe a diversos factores, entre los cuales se mencionan el crecimiento acelerado de la población en el último siglo, la falta de infraestructura para el saneamiento de aguas residuales (vertidas sin ningún tratamiento al Río Manzanares), las invasiones sin control en las laderas del río, sobre una franja de hasta 30 m de ancho. Según lo define el Artículo 83, literal “d”, del Decreto 2811 (MA, 1974), esto significa un riesgo para la seguridad de los invasores y un incumplimiento de la norma. Otros factores contaminantes están relacionados con la inadecuada disposición de residuos sólidos, la dinámica hidráulica del río y la utilización de pesticidas y fertilizantes agrícolas que contribuyen al detrimento de la calidad del agua. Tanto las aguas residuales domésticas como las industriales poseen características físico-químicas y biológicas que al ser vertidas continuamente al río sin ningún tipo de tratamiento causan una sobrecarga de la capacidad de autopurificación del cuerpo hídrico, ocasionando efectos negativos, como por ejemplo la disminución del nivel de oxígeno disuelto y la muerte de la biota acuática (Guizao y Díaz, 2007).

Estudios microbiológicos realizados a lo largo del cauce del río Manzanares, atendiendo a criterios de uso para consumo humano y fines recreativos, arrojan resultados negativos respecto a la calidad del agua de este afluente, superando los límites permisibles establecidos en la legislación colombiana. Este afluente natural aporta a la bahía de Santa Marta gran cantidad de sedimentos, nutrientes, materiales que demandan oxígeno, patógenos, residuos sólidos y líquidos, ocasionando un impacto significativo en la calidad fisicoquímica y biológica del agua de esta bahía (CORPAMAG, 2005). Una de las mayores preocupaciones radica en la fuente de captación utilizada para el abastecimiento del agua, pues al presentar alteraciones en sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, proyectaría un riesgo sanitario presente en el agua, transportando agentes contaminantes que causarían enfermedades de origen hídrico al hombre (Sabogal, 2000). Por ejemplo, en el corregimiento de Bonda se ha generado gran preocupación en la salud pública debido a la elevada morbilidad por enfermedades

gastrointestinales. En este corregimiento el servicio de aprovisionamiento de agua potable tiene una cobertura del 88%, mientras que la cobertura del servicio de “alcantarillado” es del 74%.

En el ámbito nacional se registra que en la cuenca del río San Juan (Antioquia) se llevó a cabo la caracterización cualitativa y cuantitativa de la calidad y cantidad del agua superficial, mediante el análisis de sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Se encontró que los puntos donde se realizan vertimientos, especialmente en el sector de Ciudad Bolívar, se registran cambios significativos en la calidad del agua (GAIA y GIGA, 2002). Otro estudio es el efectuado en las quebradas La Cristalina y La Risaralda (Antioquia), en el cual se registraron altas concentraciones de oxígeno debido a la turbulencia del lecho rocoso. No obstante, el análisis microbiológico arrojó altos índices de NMP/ml de coliformes, atribuidos a vertimientos de tipo doméstico y agropecuario que limitaban su uso (Arango et al., 2008).

En Colombia se han desarrollado diferentes estudios sobre la estandarización del Índice de Calidad de Agua (ICA), a través de características físicas, químicas y biológicas de algunas fuentes de agua superficial. En el Valle del Cauca se adaptó el ICA-NSF a las condiciones específicas del río Cauca, reduciendo el número de parámetros que lo conforman, con base en el análisis del comportamiento de éstos en el tiempo y en el espacio y modificando los pesos porcentuales asignados a cada parámetro de acuerdo con su nivel de importancia en la evaluación de la calidad del agua del río Cauca (Rojas, 1991; Torres et al., 2009). Ramírez y Viña (1998) desarrollaron los índices de contaminación (ICO) a partir del análisis de componentes principales (ACP) aplicado a información fisicoquímica resultante de diferentes estudios limnológicos relacionados con la industria colombiana del petróleo. Estos índices evalúan el nivel de contaminación del agua mediante la agrupación de variables fisicoquímicas que denotan la misma condición ambiental. Actualmente existen nueve modalidades de ICO, entre las cuales se destacan el índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), por mineralización (ICOMI) y por sólidos (ICOSUS).

Diferentes estudios efectuados en la cuenca hidrográfica del río Manzanares han evaluado su recuperación fluvial e integral, planteándose una propuesta de manejo en la parte baja y urbana de la cuenca (Ribón y Rodríguez, 2002). Asimismo, se han realizado caracterizaciones

hidrológicas y se ha evaluado la disponibilidad hídrica, estimando los caudales de escorrentía superficial del río (De Arco y De León, 2006). Adicionalmente, otros estudios se han enfocado en la aplicación de simuladores de la calidad del agua, basados en modelos sistemáticos durante períodos de lluvia y sequía. También se ha llevado a cabo la modelación y simulación del oxígeno disuelto del río Manzanares a través de herramientas computacionales (Guizao y Díaz, 2007; Alvis y Nieves, 2008). Teniendo en cuenta los antecedentes planteados y la necesidad de conocer el estado actual de la calidad sanitaria del agua de la parte baja del río Manzanares, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua en este sector del río, con base en la determinación de sus características fisicoquímicas y microbiológicas, a fin de diagnosticar su uso más factible de acuerdo con la normatividad colombiana vigente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo

La cuenca del Río Manzanares se origina en la unión de las quebradas Onaca y Jirocasaca, en la vertiente noreste de la Sierra Nevada de Santa Marta, y se extiende desde el nivel del mar hasta la cota de 2300 msnm, con 174,54 km² de superficie, 70,34 km de perímetro y 33,50 km de largo en su cauce principal. La parte baja de la cuenca del río Manzanares es escarpada, con pendientes mayores al 60% y vegetación de bosque seco tropical (Parodi et al., 1996). Las estaciones de muestreo se situaron en seis sitios de la cuenca baja del río, entre el balneario del corregimiento de Bonda y las principales quebradas tributarias de la cuenca baja del río. Las estaciones de muestreo fueron: quebrada Vira Vira (11°14'06,6"N-74°04'18,1"W), quebrada Chucunchaca (11°15'09,7"N-74°07'07,3"W), quebrada Donama (11°14'15,0"N-74°03'56,7"W) y quebrada Matogiro, en dos tramos ubicados en el corregimiento de Bonda (11°14'0,4"N-74°07'42,4"W y 11°14'06,6"N-74°07'42,5"W) (Figura 1).

Fase de campo

La selección de los puntos de muestreos es una decisión muy importante al momento de la toma de las muestras. Para el efecto, se siguieron las normas técnicas respectivas y las recomendaciones establecidas en la guía metodológica de la política nacional del recurso

hídrico y la metodología general para la presentación de estudios ambientales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT (MAVDT, 2010). También se tuvieron en cuenta los criterios de la comunidad y los puntos de mayor captación cerca de las veredas y asentamientos humanos. El monitoreo del recurso hídrico duró cuatro meses (junio, agosto, octubre y diciembre del 2010). Se tomó como referencia la guía para el Monitoreo y Seguimiento del agua (IDEAM, 2004). Las muestras en campo se almacenaron en recipientes de polipropileno de 600 ml, con tapa del mismo material para el caso de parámetros fisicoquímicos. Los frascos se purgaron con solución ácida para eliminar cualquier material indeseado, luego fueron lavados con agua desionizada y secados a 70°C en estufa tipo horno marca Memmert. Para las muestras de los análisis microbiológicos se utilizaron frascos de vidrio de 250 ml y cierre hermético, previamente esterilizados. Las muestras se recolectaron a 30 cm de profundidad, abriendo el recipiente dentro de la columna de agua para evitar contaminación. Simultáneamente se procedió a la toma de muestras para los análisis fisicoquímicos. Luego se rotularon los envases con el sitio, fecha, hora y otros datos adicionales referentes al punto de muestreo. Posteriormente se refrigeraron a 4°C hasta la llegada al laboratorio, donde se analizaron inmediatamente (APHA, AWWA y WPCF, 1998).

En los sitios de muestreo se registraron directamente los siguientes parámetros, utilizando un equipo múltiparametro WTW 350i/set 2F40-114BOE: temperatura (°C), conductividad eléctrica (CE, µS/cm), potencial hidrógeno (pH) y oxígeno disuelto (OD, mg/l). Para determinar el fósforo, las muestras se acidularon con ácido clorhídrico, a razón de 1,5 ml por cada litro de muestra, y se conservaron refrigeradas a 4°C para evitar cambios de volumen por procesos de evaporación. Análogamente, las muestras destinadas a establecer la DQO se acidularon con 0,5 ml ácido sulfúrico concentrado y también se refrigeraron a 4°C.

Fase de laboratorio

La determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se realizó en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad del Magdalena, siguiendo técnicas y métodos estandarizados (Tabla 1). Se analizaron las muestras por triplicado, según las técnicas descritas en APHA, AWWA y WPCF (1998).



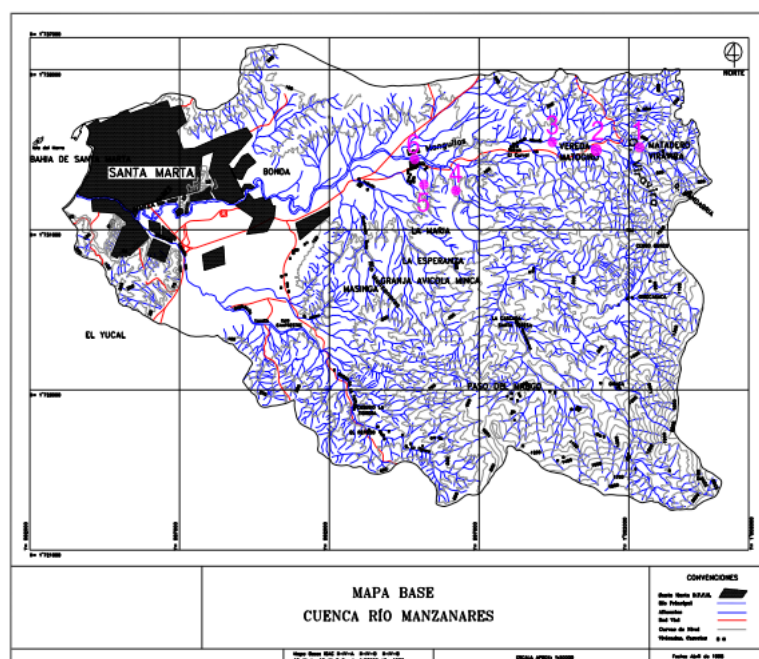


Figura 1. Localización de los puntos de muestreos en la cuenca baja del río Manzanares

Tabla 1. Técnicas de análisis fisicoquímico y microbiológicos en muestras de agua establecidas por Standard Methods y la Agencia de Protección Ambiental.

Parámetros	Técnica Analítica	Método
Conductividad	Potenciométrico	2510 A SM
DBO ₅	ODM	5210 B SM
DQO	Fotométrico	5220 D SM
Oxígeno disuelto	Electrodo de membrana	4500 OG SM
pH	Electrométrico	4500 H-B SM
Sólidos Suspendidos totales	Gravimétrico	2540 D SM
Sólidos Totales	Gravimétrico	2540 B SM
Grasas y Aceites	Gravimétrico	5520 D SM
Alcalinidad Total	Titulométrico	2320 B SM
Color	Fotométrico	2120 C SM
Sulfato	Fotométrico	4500 SO ₄ E SM
Hierro total	Fotométrico	3500 Fe D SM
Turbiedad	Nefelométrico	EPA 180,1
Fósforo (fosfatos)	Fotométrico	4500P E SM
Nitritos	Colorimétrico	4500 NO ₂ B SM
Nitratos	Reducción de cadmio	4500 NO ₃ E SM
Temperatura	Electrométrico	2550 B SM
Coliformes totales	Fermentación en tubos múltiples	9221B SM
Coliformes fecales	Fermentación en tubos múltiples	9221B, 9221E SM

SM = Standard Methods EPA = Agencia de Protección Ambiental



Análisis estadístico

A partir de las variables medidas en las estaciones de muestreo se efectuó un estudio exploratorio de datos con la utilización de algunas medidas de localización (media y mediana), medidas de variabilidad (desviación estándar y coeficiente de variación) y medidas de simetría (sesgo estandarizado). Para caracterizar el comportamiento de los sitios muestreados se realizó inicialmente un Análisis de Componentes Principales (ACP), considerando como matriz de inercia la matriz de correlaciones dado que se conjuga información con diferentes unidades y magnitudes. El número de componentes a retener se determinó con el criterio de Kaiser-Guttman, lo que implica retener aquellos componentes con un valor propio mayor de 1. Posteriormente, se realizó un análisis de conglomerados o de cluster, utilizando el método de Ward o método de la suma de cuadrados, donde los grupos se unen y crean de tal manera que se minimice la suma de cuadrados total de las distancias dentro de cada cluster. Una vez realizada la agrupación se procedió a calcular el coeficiente de correlación cofenética (Sokal y Rohlf, 1962). El valor de este índice va de 0 a 1; un bajo valor de este coeficiente indica una distorsión notable entre las disimilaridades calculadas a partir del coeficiente de similaridad y las que resultan del dendrograma de los grupos formados. Los análisis estadísticos se realizaron con los paquetes estadísticos STATGRAPHICS Centurion versión XV y SPSS versión 20.0.0.

Diagnóstico acerca del uso factible

Para evaluar la destinación del agua de los sitios monitoreados es necesario señalar lo que establece la normatividad colombiana a través del Decreto 1575 de 2007, la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la Protección Social – MPS y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT (MPS y MAVDT, 2007) y el Decreto 3930 de 2010, el cual no contempla valores permisibles de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua para los diversos usos. Por consiguiente, para ello se utilizaron los valores referenciados en el Decreto 1594 de 1984, transitoriamente vigente.

El agua suministrada al corregimiento de Bonda corresponde a agua cruda, captada en tres puntos de la tubería Paso del Mango – planta de Mamatoco. Las captaciones son de 2 pulgadas, para un total de 6 pulgadas. Por lo tanto, para conocer el grado de aceptación se siguieron los criterios contemplados en la Resolución 2115 de 2007, debido a que no existe

en Colombia normatividad atinente a aguas crudas utilizadas para uso doméstico o consumo. Teniendo en cuenta lo establecido en la normatividad anteriormente señalada, se puntualiza la importancia de preservar una adecuada calidad del agua debido a que:

- Compromete su disponibilidad para ciertos usos.
- Constituye un riesgo para la salud de la población asentada cerca de estas corrientes.
- Representa un peligro para aquellos usuarios que directamente la utilicen para sistemas de riego.
- Afecta a los consumidores de los productos que son regados con esta agua.
- Reduce las opciones para diversificar cultivos.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos permitieron una aproximación a la calidad del agua en cada una de las estaciones durante los cuatro meses de muestreo. En la Tabla 2 se presentan estos valores y se comparan con los valores exigidos por la Resolución 2115, respecto al consumo y uso doméstico. La Tabla 3 muestra las medidas de localización y variabilidad de los parámetros evaluados para cada una de las estaciones.

Los resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) indican que la dimensionalidad de la matriz de datos puede reducirse a 4 componentes o variables combinadas con valores propios que oscilan desde 5,48 a 1,16 y que explican cerca del 92% de la varianza.

El dendrograma obtenido mediante el análisis cluster muestra las relaciones existentes entre las estaciones de muestreo estudiadas (Figura 2). La matriz de distancias entre las poblaciones presenta un coeficiente de correlación cofenética de 0.706, valor considerado aceptable, logrando representar suficientemente en el dendrograma la distancia entre los sitios estudiados. En el dendrograma se observa la formación de tres grupos: 1) la estación 1, formada por la quebrada Donama, que se consideró como el punto de menor contaminación, 2) las estaciones 2, 3 y 4, conformadas por las quebradas Matogiro, Vira Vira y el agua suministrada a Bonda, designadas como puntos de contaminación media-baja y 3) las estaciones 5 y 6, correspondientes al río Manzanares y la quebrada Chucunchaca, que son los puntos ubicados en los sectores de mayor contaminación y, además, son los sitios en donde se registraron los mayores vertimientos de tipo doméstico, desde el punto de vista de carga y volumen vertido.



Tabla 2. Valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en las muestras de agua de las estaciones monitoreadas.

Parámetro	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 5	Estación 6	Resolución 2115/ 2007
Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	131	145	154	185	201	212	1000
DBO $\text{mg}/\text{L O}_2$	7,42	5,70	7,92	3,74	9,65	8,76	N.E
DQO $\text{mg}/\text{L O}_2$	25,3	37,8	52,6	22,9	57,9	63,5	N.E
Oxígeno disuelto $\text{mg}/\text{L O}_2$	6,24	6,12	5,33	6,85	6,67	6,13	N.E
pH	7,85	7,71	7,45	7,86	8,12	7,46	6,5 - 9,0
Sólidos Suspendidos Totales mg/L	84	93	102	66	104	145	N.E
Sólidos Totales mg/L	325	308	319	274	375	356	N.E
Alcalinidad Total mg/L	102	147	154	112	156	163	200
Color U Pt-Co	60	63	87	40	104	114	15
Sulfato mg/L	28	27	38	48	56	67	250
Hierro Total mg/L	0,52	0,56	0,66	0,33	0,64	0,60	0,3
Turbiedad mg/L	22,43	35,56	24,22	3,89	48,88	57,54	2
Fosforo mg/L	0,12	0,18	0,17	0,18	0,25	0,31	0,5
Nitratos mg/L	0,45	0,45	0,56	0,34	0,66	0,57	10
Nitritos mg/L	0,13	0,11	0,17	0,15	0,23	0,28	0,1
Temperatura $^{\circ}\text{C}$	26,7	26,8	27,2	28,9	28,8	29,7	N.E
Coliformes Totales NMP/100 mL	1340	1620	2330	1890	4820	6840	0
Coliformes Fecales NMP/100 mL	640	580	670	820	1120	1180	0

Tabla 3. Medidas de centralización y de variabilidad de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de agua de las estaciones monitoreadas.

Parámetro	Promedio	Mediana	Desviación estándar	CV
Conductividad $\mu\text{s}/\text{cm}$	140,1	131,35	35,24	25,16%
DBO ₅ mg/L	8,42	6,1	5,64	42,01%
DQO mg/L	29,62	19	26,02	87,83%
Sólidos Totales mg/L	355	352,5	60	16,90%
Sólidos Suspendidos Totales mg/L	198,5	196	92,61	46,65%
Alcalinidad mg/L	102,4	95,95	37,97	37,08%
Dureza Total mg/L	55,17	53,5	16,33	29,60%
Turbiedad NTU	180,53	171	98,26	54,43%
Hierro Total mg/L	12,15	12,21	1,54	12,68%
Color Verdadero UPT/Co	51,67	60	13,29	25,73%
Fosforo mg/L	0,11	0,09	0,04	95,22%
Nitritos mg/L	0,05	0,03	0,05	92,95%
Nitratos mg/L	1,55	1,17	0,94	60,95%



Continuación de la Tabla 3.

Parámetro	Promedio	Mediana	Desviación estándar	CV
Coliformes Totales NMP/100 ml	249	68	425,74	170,98%
Coliformes Fecales NMP/100 ml	17	21,5	8,37	49,22%
pH unidades	7,4	7,38	0,23	3,06%
oxígeno Disuelto mg/L	6,82	6,9	0,96	14,05%
Temperatura °C	24,8	25	0,7	2,83%

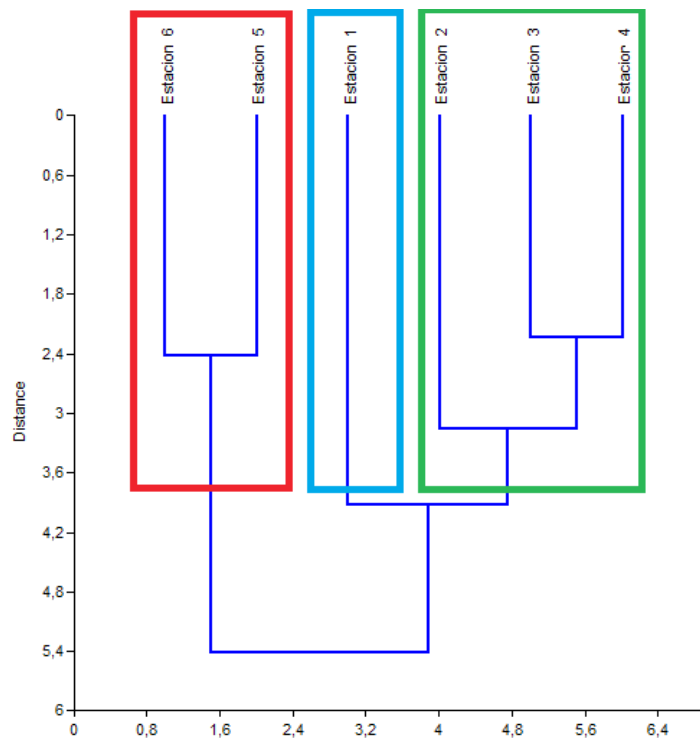


Figura 2. Dendrograma de relaciones existentes entre las estaciones de muestreo estudiadas en la cuenca baja del río Manzanares.

DISCUSIÓN

En primera instancia, los coeficientes de variación observados (CV), superiores al 30%, pueden considerarse como indicadores de alta variabilidad y heterogeneidad espacial de las variables evaluadas. Esto implica una gran disimilaridad en las condiciones de los sistemas hídricos respecto a la calidad del agua, es decir, condiciones particulares en sitios específicos dentro del sistema, relacionadas con alguna actividad propia de la zona. Esta variabilidad se debe a que las condiciones fisicoquímicas del agua en las primeras tres estaciones no registran grandes volúmenes vertidos como sucede

en el río Manzanares y en las quebradas Chucunchaca y Matogiro. La variación considerable de la DBO se deriva de grandes aportes de materia orgánica en sólidos totales y suspendidos. Estos aportes generan pérdidas de materia orgánica y energía del sistema hídrico que no han sido cuantificadas. Tampoco se han establecido los sectores de la cadena trófica en los que se están depositando dichos aportes. Por lo anterior, es necesario implementar medidas ambientales y biológicas para establecer los sectores o puntos de almacenamiento de dicha energía, determinando los ecosistemas afectados por esta problemática. Este tipo de seguimiento se debe enfocar en los puntos de mayor almacenamiento



de materia orgánica, los cuales pueden evaluarse mediante los valores de DBO, DQO, sólidos en todas sus formas, nitritos, nitratos y alcalinidad. Mediante dicha información se pueden establecer los puntos de la cuenca y de los ecosistemas adyacentes afectados por acumulación de nutrientes y procesos de sedimentación. En ese sentido, es necesario implementar estrategias de reducción de cargas de contaminantes en los ecosistemas, como lo establece el Decreto 4728 del 2010 (MAVDT, 2010).

De manera conjunta, los parámetros DBO, DQO, sólidos, alcalinidad, nitritos, nitratos y coliformes permitieron explicar el 92% de la variabilidad observada en el sistema, es decir, la situación actual de la problemática y el comportamiento del recurso hídrico. La mayor turbiedad (48,88 mg/l y 57,54 mg/l) correspondió a aquellos sitios que, en razón a la mayor actividad antrópica, presentan niveles más altos de represamiento y vertimiento (estaciones 5 y 6, respectivamente). En estos sitios se registra una alta correlación con los valores de las variables sólidos y color. En términos generales, las aguas analizadas son relativamente claras en los períodos de bajas precipitaciones y muy turbias en períodos de altas precipitaciones, lo que no permite la penetración de la luz solar al fondo del lecho, afectando en buena medida los diferentes procesos fotosintéticos y metabólicos del sistema (Quiroz-Castelán et al., 2004).

La conductividad en las distintas estaciones muestra una tendencia a valores altos en los meses de agosto, octubre y diciembre, concordante con los períodos de lluvias en la zona. Esta condición se debe probablemente a la disolución de los materiales minerales de los cauces. Sin embargo, estas variaciones pueden considerarse bajas, pues el sistema presenta condiciones de pH estable, lo que permite mantener las concentraciones de iones constantes en la columna de agua. Los valores reportados por Toro et al. (2002) oscilaron entre 76 y 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para períodos secos y períodos de lluvias, respectivamente. Para el caso de pH se determinaron variaciones que oscilaron entre 6,7 y 8,12, lo cual no afecta el normal desarrollo de la vida acuática y tampoco su utilización para los diferentes usos consecutivos y no consecutivos (MA, 1984; Brown, 1999).

La alcalinidad registró valores comprendidos entre 92 y 163 mg/l, indicando que se trata de aguas poco alcalinas, de condición aceptable. Rivera et al. (2004) señalaron que alcalinidades de 20 mg/l son aptas para la preservación de la vida acuática. La alcalinidad en

la mayoría de los cuerpos de aguas naturales tiene su origen en el sistema de los carbonatos, debido al bióxido de carbono y los bicarbonatos, sin dejar de tener en cuenta la contribución de algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos, que forman parte del metabolismo de los organismos vivos, aeróbicos y anaeróbicos. La alcalinidad representa el principal sistema amortiguador del agua dulce; además, desempeña un papel relevante en la productividad de los cuerpos de agua naturales, sirviendo como fuente de reserva para la fotosíntesis (Belfore, 2003). La anterior condición establece que los sistemas hídricos de la parte baja del río Manzanares son un cuerpo de agua estables que presenta pocas variaciones, lo que condiciona a que sus aguas sean aptas para fines agrícolas, según lo dispuesto en el Decreto 1594 de 1984, transitoriamente vigente (MA, 1984).

Los niveles de oxígeno registrados en las seis estaciones de muestreo se inscriben dentro del intervalo de valores óptimos para mantener el equilibrio ecológico. Según Cude (2001) y Belfore (2003), los valores normales de oxígeno disuelto se encuentran entre 6,5 y 8 mg/l, siendo 5 mg/l la concentración mínima requerida para mantener el equilibrio en los ecosistemas acuáticos. Estos autores consideran que 3 mg/l es un nivel crítico e indican que valores inferiores implican condiciones de eutrofización, donde se esperan daños ecológicos en los sistemas hídricos continentales, estuarios y zonas costeras.

Las concentraciones de fósforo son menores para los períodos secos (junio) y mayores en los períodos de precipitaciones (agosto, octubre y diciembre), debido al acarreo de material, vertimientos y arrastres de productos agrícolas aplicados en la zona. Las concentraciones oscilan entre 0,10 y 0,31 mg/l para períodos secos y lluviosos, respectivamente. Sin embargo, las concentraciones no exceden los límites permisibles para consumo humano, según lo dispuesto en la Resolución 2115 de 2007 (MPS y MAVDT, 2007). En este mismo sentido, las concentraciones de fósforo favorecen la utilización del recurso en sistemas de riego, al ser considerado como un factor limitante de la productividad (Decreto 3930 de 2010, valores permisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984 transitoriamente vigente), dadas las concentraciones adecuadas de nutrientes aplicables a diversos cultivos. Similar condición registraron las concentraciones de nitritos y nitratos, con tendencias a presentar mayores concentraciones en períodos de máximas precipitaciones



en la zona, con valores que oscilaron entre 0,57 y 0,66 mg/l para nitratos y entre 0,23 y 0,28 mg/l para nitritos. Esta condición conlleva a los sistemas hídricos a procesos de eutrofización durante los períodos de lluvias, lo que representa una limitante para la utilización del recurso en sistemas de abastecimiento para consumo, en virtud a las concentraciones de nutrientes registradas, en especial de nitritos. Los nitritos son considerados un estado intermedio de la oxidación del nitrógeno, tanto en la oxidación del amoníaco a nitrato como en la reducción en nitrato. La presencia de nitratos puede deberse a la aplicación excesiva de fertilizantes o a la filtración de aguas residuales u otros residuos orgánicos en las aguas superficiales y subterráneas (OMS, 2006).

Durante el período de bajas precipitaciones, los valores de DBO registrados en las estaciones 5 y 6 (9,65 mg/l y 8,76 mg/l, respectivamente) corresponden a aguas con baja cantidad de materia orgánica y suficientes niveles de oxígeno disuelto para oxidarla y al mismo tiempo reoxigenarse, impidiendo la acumulación excesiva de materia orgánica en su lecho. Sin embargo, en los períodos de lluvias las condiciones de materia orgánica van de medias a aceptables, según la clasificación realizada por el Consejo del Sistema Veracruzano del Agua (2004). Esta comparación se realizó debido a la falta de valores comparables en la legislación colombiana con los objetivos de calidad del recurso hídrico para la cuenca, refiriéndose a aguas con algún indicio de contaminación y con capacidades de autodepuración.

Para el caso de las concentraciones de hierro, este elemento presentó valores que oscilaron entre 0,08 en períodos de bajas precipitaciones y 0,75 mg/l en períodos lluviosos. Además, las concentraciones son inferiores al límite permisible de calidad de aguas para riego (5 mg/l), según lo estipulado en el Artículo 40 del Decreto 1594 de 1984 (MA, 1984). Los valores registrados se deben al arrastre de materiales tales como sedimentos tipo arcillosos, los cuales contienen hierro en su base estructural. El hierro aparece en el agua en sus distintos estados de oxidación; no se considera tóxico para el hombre aunque puede originar problemas de olor o sabor, incluso a bajas concentraciones. El hierro puede depositarse como hidróxido y obturar las branquias de los organismos, disminuyendo su potencial respiratorio. Para algunos peces, valores de pH en agua de 6,5 a 7,5 y concentraciones de hierro de 0,9 mg/l tienen un efecto mortal, particularmente para los huevos y larvas cultivadas a estas altas concentraciones (Baird, 2001).

Los coliformes fecales integran el grupo de los coliformes totales, pero se diferencian de las demás bacterias que hacen parte de este grupo; son indicadores de higiene en alimentos y en aguas, dado que la presencia de estas bacterias indica contaminación fecal de origen humano o animal, ya que las heces contienen dichos microorganismos, presentes en el tracto intestinal. Entre un 90% y un 100% de estos coliformes fecales corresponden a *Escherichia coli*, mientras que en aguas residuales y muestras de aguas contaminadas este porcentaje disminuye hasta un 59% (Mora, 1998). Desde hace tiempo, se reconoce que los organismos del grupo coliformes son buenos indicadores microbianos de la calidad del agua potable, debido a que son fáciles de detectar y enumerar en el agua. La presencia de *E. coli* en muestras de agua potable indica la existencia de fallas en la eficacia de tratamiento de agua y la integridad del sistema de distribución, siendo por tanto una evidencia de contaminación de diferentes orígenes: suelo, superficies de agua dulce y tracto digestivo (Otterholt y Charnock, 2011). Las concentraciones de coliformes encontradas en las diferentes estaciones de muestreo de la cuenca baja del río Manzanares muestran índices de contaminación bacteriana que se incrementan a medida que se desciende en su cauce. Estos resultados muestran algunas deficiencias en materia de saneamiento básico, en ciertos sectores de la cuenca, derivados de mala disposición de residuos sólidos y aguas residuales domésticas sin previo tratamiento.

Los resultados de los análisis microbiológicos muestran que se trata de aguas con contaminación fecal no aptas para consumo humano, según lo estipulado en la Resolución 2115 de 2007 (MPS, 2007). El corregimiento de Bonda y las veredas cercanas utilizan el agua del río Manzanares (agua cruda) como fuente de abastecimiento público sin emplear ningún tipo de tratamiento, incumpliendo de esta manera lo establecido en el Decreto 1575 de 2007 y Resolución 2115 de 2007 (tratamiento convencional floculación - coagulación con sulfato de aluminio).

Las aguas de la cuenca baja del río Manzanares no presentan restricciones para su utilización en actividades de contacto primario y secundario para actividades de recreación, según lo establecido en el Decreto 3930 de 2010 y los valores permisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984, transitoriamente vigente. Asimismo, el recurso hídrico del sector de Bonda reúne condiciones para su utilización en sistemas de riego, preservación de fauna y flora, actividades de acuicultura y preservación



de ecosistemas adyacentes, según lo establecido en los Artículos 40 y 41 del Decreto 1594 de 1984. A pesar de que el sector del corregimiento de Bonda es ampliamente utilizado como sistema de recreación y balneario (contacto primario), no cumple con los niveles de coliformes totales y fecales exigidos en la norma antes señalada. Las variaciones en los coliformes en todas las estaciones durante los meses monitoreados pueden estar relacionadas con las precipitaciones que implican el aporte de materia orgánica y sólidos a través de la escorrentía y lavado de suelo. Otro factor que puede incidir en los niveles de coliformes detectados en esta zona es la presencia de puntos de descargas de aguas residuales de criaderos de animales, agrícolas y domésticas que no presentan ningún tipo de tratamiento.

Algunos microorganismos patógenos de transmisión fecal oral pueden estar presentes en el agua cruda. Tal es el caso de las bacterias de los géneros *Salmonella* y *Shigella* y los coliformes totales y fecales, las cuales han sido encontradas en abastecimientos de aguas (OMS, 2006). De acuerdo a los datos suministrados por la Secretaria de Salud Distrital, los casos diarreicos aumentaron un 2,7 % en el año 2010 respecto a los registrados en el 2009; ello posiblemente esté asociado al hecho de que las precipitaciones registradas durante el año 2010 disminuyeran la calidad del agua de suministró y de las fuentes hídricas en mención. Los resultados registrados en esta investigación demuestran que son aguas con un alto contenido de sólidos, altas concentraciones de nutrientes y altos niveles de contaminación por heces fecales, considerados por la organización mundial de la salud OMS como uno de los principales causantes de la trasmisión de enfermedades diarreicas agudas.

CONCLUSIONES

Considerando la normatividad colombiana sobre el uso y destinación del agua se concluye lo siguiente: a) el agua de las quebradas Vira Vira, Donama, Matogiro y Chucunchaca y del río Manzanares puede ser utilizada en fines recreativos (mediante contacto secundario), agrícolas, pecuarios, preservación de fauna y flora y mantenimiento de ecosistemas asociados; b) el agua de suministro del corregimiento de Bonda no cumple con las condiciones de color, turbiedad, concentraciones de nitritos y coliformes totales y fecales establecidas en la Resolución 2115 de 2007; c) el sistema hídrico

categorizado como de buena calidad correspondió a la quebrada Donama; d) el sector del río Manzanares es el punto de mayor contaminación, siendo sus aguas categorizadas como de mala calidad; y e) el agua de las quebradas Matogiro, Vira Vira, Chucunchaca y el agua suministrada al corregimiento de Bonda es de regular calidad. En consecuencia, la destinación del recurso hídrico indica que el uso no es apropiado para el consumo humano y el contacto primario a través de actividades de recreación. Es recomendable iniciar actividades que minimicen los índices de coliformes en la cuenca. Los parámetros de DBO, DQO, nitritos, sólidos y coliformes totales y fecales son los principales factores que afectan las características del recurso hídrico, explicando un 92% del comportamiento del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad del Magdalena, por proporcionar los reactivos, medios de cultivos y equipos usados para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Alvis, E. y E. Nieves. 2008. Desarrollo de un modelo computacional para la modelación y simulación del oxígeno disuelto del río Manzanares. Universidad del Magdalena, Tesis de grado, Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Santa Marta, Colombia, 60 p.

APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), y WPCF (Water Pollution Control Federation). 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, Washington, 1193 p.

Arango, M., L. Álvarez, G. Arango, O. Torres y A. Monsalve. 2008. Calidad del agua de las Quebradas La Cristalina y La Risaralda, San Luis, Antioquia. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia 9: 121 – 141.

Baird, C. 2001. Química Ambiental. Editorial Reverte, Barcelona, 452 p.

Belfore, S. 2003. The growth of integrated coastal management and de role of indicators in integrated coastal management: Introduction to special issue. Ocean and coastal management 46: 225–234.

Brown, T. 1999. Química, la ciencia central, Quinta Edición. Prentice Hall, México, 247 p.



- Consejo del Sistema Veracruzano del Agua (México). 2004. Guía metodológica para el cálculo de tarifas por la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Dirección de Planeación y Programación Hídrica. Veracruz, 35 p.
- CORPAMAG (Corporación Autónoma Regional del Magdalena). 2005. Resolución N° 254. Por medio de la cual se impone a la empresa Metroagua S.A. el cumplimiento de una serie de obligaciones, Santa Marta, 8 p.
- Cude, C. 2001. Water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association* 37(1): 125-137.
- De Arco, D. y D. De León. 2006. Caracterización hidrológica de la cuenca del río Manzanares y evaluación de su disponibilidad hídrica. Universidad del Magdalena, Tesis de grado, Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Santa Marta, 75 p.
- GAIA (Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental) y GIGA (Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental). 2002. Caracterización cualitativa y cuantitativa de la calidad y la cantidad del recurso hídrico superficial en la Cuenca del río San Juan. Universidad de Antioquia - Universidad Nacional, sede Medellín, 72 p.
- Guizao, J. y J. Díaz. 2007. Simulación de la calidad del agua del Río Manzanares utilizando el modelo Qual2k. Universidad del Magdalena, Tesis de grado, Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Santa Marta, 49 p.
- Hincapié, L. y M. Atencio. 2002. Descripción de los residuos sólidos arrastrados por el río Manzanares a la Bahía de Santa Marta. Universidad del Magdalena, Tesis de grado, Especialización en Ciencias Ambientales. Santa Marta, 83 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2004. Guía para el monitoreo y seguimiento del agua. IDEAM, Bogotá, 39 p.
- MA (Ministerio de Agricultura). 1974. Decreto 2811 de diciembre de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medioambiente. Presidencia de la Republica de Colombia, Bogotá, 62 p.
- Ministerio de Agricultura (MA). 1984. Decreto 1594 de junio de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - Parte III -Libro II y el Título III de la Parte III - Libro I - del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Ministerio de Agricultura, Bogotá, 55 p.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2010. Decreto 4728 de diciembre de 2010: por la cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010. Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, 3 p.
- MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). 2010. Metodología general para la presentación de estudios ambientales. Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, 71 p.
- Mora, D. 1998. Actualización de los criterios microbiológicos para evaluar la calidad del agua en sus diferentes usos. *Revista Costarricense de Salud Pública* 7(13): 45 - 52.
- MPS (Ministerio de la Protección Social) y MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). 2007. Resolución 2115 de junio de 2007: Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Ministerio de la Protección Social, Bogotá, 23 p.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006. Guías para la calidad del agua potable. Tercera edición. Organización mundial de la Salud, Suiza, 1211 p.
- Otterholt, E. y C. Charnock. 2011. Microbial quality and nutritional aspects of Norwegian brand waters. *International Journal of Food Microbiology* 144: 455-463.
- Parodi, H., J. Serrano y M. Canchano. 1996. Influencia del río Manzanares sobre la Bahía de Santa Marta. Monografía de especialista en Ciencias Ambientales, Universidad del Magdalena, Santa Marta, 79 p.
- Quiroz-Castelán, H., L. Mora, I. Molina y J. García. 2004. Variación de los organismos fitoplanctónicos y la calidad del agua en el lago de Chapala, Jalisco, México. *Revista Acta Universitaria* 14(1): 47-58.
- Ramírez, A y G. Viña. 1998. Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadística de análisis. Universidad Jorge Tadeo Lozano, 283 p.
- Ribón, M. y D. Rodríguez. 2002. Río Manzanares, recuperación fluvial e integral y propuesta de manejo en su zona baja y urbana. Estudio geológico. Universidad del Magdalena, Tesis de grado, Programa de Ingeniería Civil. Santa Marta, 62 p.
- Rivera, N., F. Encina, A. Muñoz y P. Mejías. 2004. La calidad de las aguas en los ríos Cautín e Imperial, IX Región-Chile. *Revista Información Tecnológica* 15(5): 89 - 101.



Rojas, O. 1991. Índices de calidad del agua en fuentes de captación. Seminario Internacional sobre calidad del agua para consumo. Cali, Colombia.

Sabogal, L. 2000. El riesgo sanitario y la eficiencia de los sistemas de tratamiento en la selección de tecnologías para la potabilización del agua. Universidad del Valle, Programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cali, 189 p.

Sokal, R. y F. Rohlf. 1962. The comparisons of dendrograms by objective methods. *Taxon* 11(2): 33-40.

Torres, P., C. Cruz y P. Patiño. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano una revisión crítica. *Revistas Ingenierías Universidad de Medellín* 8(15): 79 - 84.

Toro, M., S. Robles, J. Avilés, C. Nuño, S. Vivas, N. Bonada, N. Prat, J. Alba, J. Casas, C. Guerrero, J. Cuéllar, J. Moreno, G. Moyá, G. Ramón, M. Suárez, M. Vidal, M. Álvarez e I. Pardo. 2002. Calidad de las aguas de los ríos mediterráneos del proyecto Guadalmed, características físico-químicas. *Revista Limnética* 21(3-4): 63-75.

Fecha de Recepción: 25/11/2010
Fecha de Aceptación: 20/06/2011

