

ANÁLISIS COMPARATIVO DE INDICADORES DE LA CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL

Mario Alberto Jiménez J. & Maria Victoria Vélez O.
*Escuela de Geociencias y Medio Ambiente,
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín
majimene@unal.edu.co, mvvelez@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 11 de Septiembre de 2005 / Aceptación: 30 de Septiembre de 2006 / Versión final: 17 de Octubre de 2006

RESUMEN

En este trabajo se hace un análisis comparativo de indicadores de calidad de agua como un acercamiento a la caracterización general de la calidad de las aguas superficiales de la cuenca de la quebrada Doña María localizada en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA). Para ello se ha empleado el índice de calidad de agua, WQI_{NSF} , propuesto por la National Sanitation Foundation (NSF) e índices de contaminación, ICO, ambos estimados a partir de información primaria recolectada en 110 puntos de medición distribuidos espacialmente en la cuenca. Se resalta la pertinencia de seguir empleando índices de contaminación como los usados en este trabajo para caracterizar las aguas superficiales, ya que permiten diferenciar los procesos físicos y antrópicos que ejercen mayor presión sobre la calidad del agua, y explican con menor número de variables, lo que índices de calidad general del agua como el WQI_{NSF} no pueden explicar, dado que la técnica de agregación en la que se fundamentan genera pérdida de información.

PALABRAS CLAVES: Calidad del Agua, Aguas Superficiales, Cuenca de la Quebrada Doña María, Indicadores de Contaminación.

ABSTRACT

A comparative analysis of water quality indices is developed as a first approach to characterize surface water quality in the Doña María basin, located inside the control area of AMVA and CORANTIOQUIA, environmental control agencies. A water quality index (WQI_{NSF}) developed by the National Sanitation Foundation and water pollution indices (WPI) were applied. Both indices were estimated from measurements at 110 sampling points defined along the basin river network. Water pollution indices are suggested to evaluate surface water quality and to identify what type of processes, (physical and anthropogenic), have a larger characteristics influence on the system. Furthermore, it is possible to explain similar water quality with less information using the WPIs index, compared to general water quality indices like WQI_{NSF} , which obscures information by aggregating all water quality variables in a single value.

KEY WORDS: Water Quality, Surface Waters, Doña Maria Basin, Pollution Indicators.

1. INTRODUCCIÓN

Como parte del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico de una cuenca (Decreto 1729 de 2002 – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT) en su fase de diagnóstico, las corporaciones ambientales deben realizar una caracterización de la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua de las fuentes superficiales, que permita establecer los usos del recurso más adecuados de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura, así como la capacidad asimilativa de los cuerpos de agua para mantener variables de calidad del agua por debajo de intervalos de concentración preestablecidos. Por otro lado, los mecanismos de recuperación y/o protección de la calidad que permitan alcanzar los objetivos de calidad del agua de las fuentes (Resolución 2145 de 2005 del MAVDT) de la cuenca deben ser aplicados previo conocimiento de los procesos naturales y antrópicos que ejercen mayor presión sobre las mismas.

En este trabajo se presenta una aproximación a la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca de la quebrada Doña María localizada en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) en los municipios de Medellín, La Estrella e Itagüí (Antioquia - Colombia), orientada a la identificación de las variables físicas y químicas más relevantes en términos de su magnitud (respecto a estándares de calidad) y variabilidad espacial para un plan de monitoreo de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984. Para evaluar el grado de contaminación en las fuentes monitoreadas en la cuenca se han empleado dos indicadores de calidad de agua; el primero es el índice de calidad de agua WQI_{NSF} propuesto por la National Sanitation Foundation (NSF) de los Estados Unidos de América en 1970 (Krenkel y Novotny, 1980) y aún empleado en la caracterización de fuentes superficiales (UNALMED, 2004; UNALMED, 2003). Su determinación requiere la medición de oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales (CF), pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitratos (NH_3), fosfatos (P), cambio de temperatura (DT) (del punto muestreado respecto a otro localizado aguas arriba), turbiedad (T) y sólidos

totales (ST), las cuales son llevadas a una misma escala mediante diagramas y posteriormente agregadas aritméticamente mediante la asignación de pesos.

La segunda vía adoptada corresponde a índices de contaminación (ICO) propuestos por Ramírez et al. (1997) que también se basan en técnicas de agregación (aritmética) de variables que explican diferentes mecanismos de contaminación y su escalamiento se hace a partir de ecuaciones que contemplan un amplio rango de variación de las variables en las que se fundamenta.

2. METODOLOGÍA

2.1. Generalidades de la zona de estudio

La quebrada Doña María con un área aproximada de 75,82 km², es uno de los principales tributarios al río Aburrá (también llamado río Medellín) y se encuentra localizada en la ladera occidental del Valle de Aburrá, entre los municipios de Medellín, Itagüí y La Estrella (Antioquia – Colombia).

La jurisdicción ambiental en la cuenca está dividida entre dos corporaciones, el área rural corresponde a la jurisdicción de CORANTIOQUIA y el área urbana al AMVA. En la Figura 1 se muestra la localización de la cuenca de la quebrada Doña María dentro del área metropolitana, junto con su red hídrica y las estaciones de medición disponibles en la misma.

La cuenca posee un ciclo anual bimodal de precipitación, es decir, con dos épocas secas y dos de lluvias altas. Las sequías se presentan, la primera y más intensa, en el período diciembre - febrero, y la segunda y menos intensa, en el período julio - agosto. La temporada de lluvias altas tiene sus dos puntos más altos en los meses de mayo y octubre. En la Figura 2 se muestra el ciclo anual de las estaciones de precipitación disponibles dentro de la cuenca (Astillero_2701115, San Antonio de Prado_2701038, Astilleros_2701111 y El Chuscas_2701077) y pertenecientes al IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia).

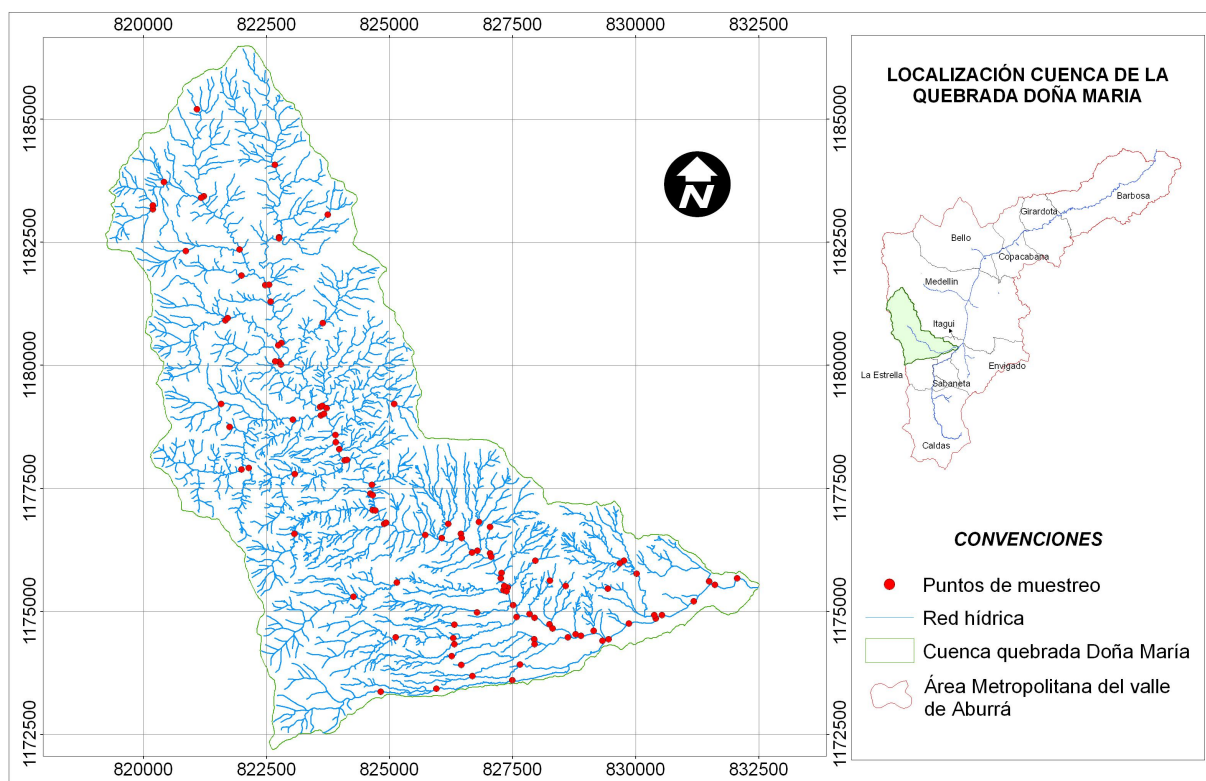


Figura 1. Localización general de la cuenca de la quebrada Doña María.

Fuente: Tomada de AMVA y UNALMED, 2006

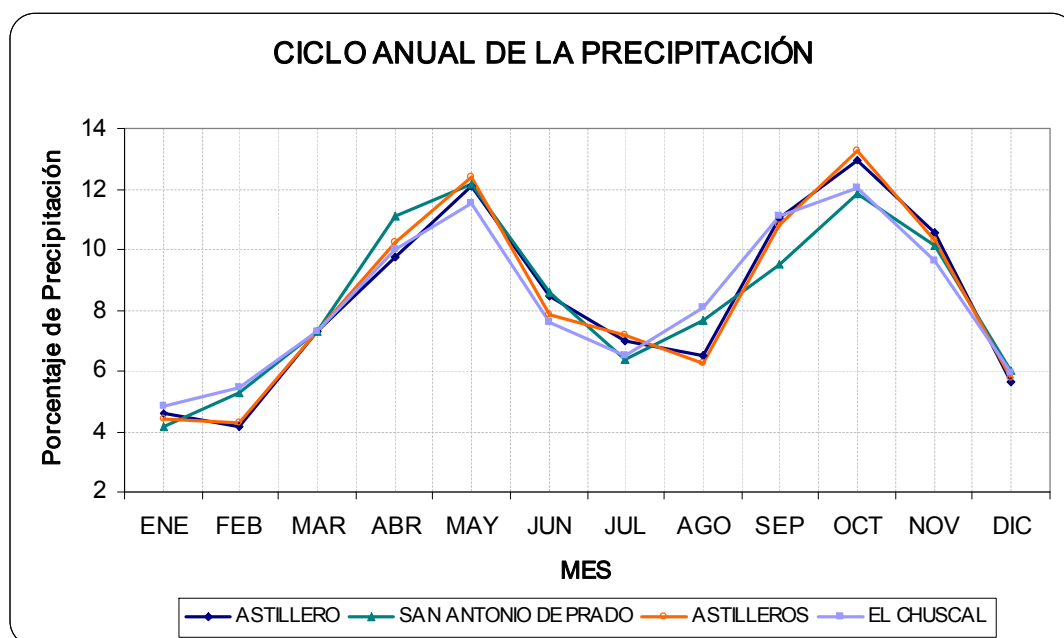


Figura 2. Ciclo anual de la precipitación media en la estaciones al interior de la cuenca de la quebrada Doña María. *Fuente:*

Tomada de AMVA y UNALMED, 2006

2.2. Estaciones de medición y variables físico - químicas

La información primaria empleada en el análisis de la calidad del agua de las fuentes superficiales de la cuenca corresponde a muestreos puntuales llevados a cabo en aquellos sitios donde por los usos actuales del suelo que los circundan, facilidades de acceso y ubicación respecto a efluentes y afluentes comprometidos en los procesos de mezcla, permiten explicar la variabilidad espacial de calidad del recurso hídrico. Se definieron 110 puntos de muestreo distribuidos espacialmente como se muestra en la Figura 1, en los cuales fue tomada sólo una muestra puntual en los meses de Agosto y Febrero, con el fin de

capturar las condiciones más críticas en la calidad del agua.

De acuerdo con lo establecido en el Artículo 24 del Decreto 1594 de 1984, las entidades encargadas del manejo y administración del recurso hídrico deben obtener, como mínimo, información de las siguientes variables: DBO, DQO (demanda química de oxígeno), SST (sólidos suspendidos totales), pH, T (temperatura), OD, Q (caudal líquido) y coliformes totales y fecales. También fueron monitoreadas las variables que se presentan en la Tabla 1, junto con el caudal líquido en el momento del muestreo.

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua muestreados

PARÁMETROS	
Coliformes fecales	Sólidos totales
Coliformes totales	Nitritos
Oxígeno disuelto campo	DQO
Demanda bioquímica de oxígeno - DBO ₅	Color verdadero
Nitratos	Grasas y aceites
Fosfatos	Nitrógeno total
Turbiedad	Fósforo total
Conductividad	

En la Tabla 2 se presenta la magnitud de las diferentes variables medidas en los diferentes puntos de medición o puntos de control (PC) definidos, cuya codificación corresponde con la secuencia de medición.

2.3. Estimación de índices

Para estimar el índice de calidad, WQI_{NSF} , se asignan factores de ponderación a cada una de las variables en las que se fundamenta, de tal forma que éste puede determinarse como (Krenkel y Novotny, 1980):

$$WQI = \sum_{i=1}^9 W_i \times Q_i \quad (1)$$

W_i denota el factor de importancia o ponderación de la variable i respecto a las restantes variables que conforman el índice, y Q_i corresponde al factor de escala de la misma. Este último depende de la magnitud de la variable y es independiente de las restantes, y se estima de acuerdo con diagramas construidos para cada variable que permiten llevarlas a una misma escala antes de ser agregadas en un sólo valor. En la Tabla 3 se presentan los pesos asignados a cada variable, y en la Figura 3 los diagramas propuestos para cada variable.

Tabla 2. Resumen de variables

ID	Q (l/s)	pH	C (μ S/cm)	Coliformes Totales (NMP)	Coliformes Fecales (NMP)	Sólido totales (mg/l)	DQO (mg/l)	OD (mg/l)	Turbiedad (mg/l)	DBO (mg/l)	Fosfatos (mg/l)	Fósforo total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)	Nitrógeno total (mg/l)
PC 1	10.38	7.42	39.00	1600	345	40	8.83	9.85	5.93	0.41	0.0125	0.1963	0.3036	0.0011	0.3640
PC 2	9.40	7.99	119.80	1600	1600	110	30.91	8.10	10.11	1.42	0.1135	0.1154	0.7323	0.0011	0.4480
PC 3	12.42	8.16	108.70	1600	920	98	21.90	8.80	10.38	0.30	0.0187	0.0205	0.1965	0.0007	0.6160
PC 4	13.29	8.02	97.20	1600	46	85	21.92	8.20	3.72	0.48	0.0175	0.0928	0.0536	0.0007	0.5040
PC 5	89.01	7.24	22.30	1600	130	35	13.15	8.50	3.54	0.26	0.0100	0.0108	0.1429	0.0004	0.4200
PC 6	222.97	8.08	98.80	1600	49	93	21.92	7.70	5.44	0.60	0.0337	0.0399	0.3572	0.0011	0.3080
PC 7	13.44	8.06	124.10	1600	1600	130	4.38	8.20	2.37	0.63	0.0324	0.0906	0.3751	0.0060	0.3360
PC 8	24.61	8.16	182.50	1600	278	90	4.38	9.05	12.22	0.64	0.0249	0.0766	0.3751	0.0011	0.7840
PC 9	36.29	8.14	104.80	1600	1600	100	10.78	8.90	6.80	0.80	0.0499	0.0572	0.2858	0.0060	0.1120
PC 10	28.20	8.13	104.80	1600	148	98	15.09	7.90	4.54	0.51	0.0586	0.0884	0.3572	0.0011	0.3920
PC 11	12.89	7.93	101.20	1600	345	80	4.27	7.80	2.79	1.85	0.0162	0.0226	0.2858	0.0004	0.7840
PC 12	210.31	7.93	70.90	1600	172	78	10.68	8.60	6.97	0.74	0.0274	0.0453	0.3215	0.0004	0.2240
PC 13	142.61	7.40	22.20	148	46	50	8.54	8.50	1.40	0.48	0.0162	0.0377	0.1786	0.0006	0.4480
PC 14	298.79	7.95	51.20	542	240	50	4.26	8.05	4.50	0.58	0.0224	0.0496	0.2143	0.0006	0.3080
PC 15	226.44	7.93	47.90	920	141	50	4.26	7.95	3.26	0.37	0.0212	0.0453	0.1607	0.0004	0.2800
PC 16	53.79	8.33	129.60	1600	542	98	2.13	7.77	7.44	0.51	0.0362	0.0841	0.3572	0.0004	0.3080
PC 17	95.55	7.25	21.50			35	6.38	8.10	3.34	0.60	0.0100	0.0110	0.2679	0.0004	0.2240
PC 18	23.96	7.66	33.20			48	4.98	7.90	6.79	0.29	0.0013	0.0162	0.1250	0.0004	0.2800
PC 19	54.43	7.14	20.90			15	2.49	8.10	1.88	0.31	0.0025	0.0194	0.0536	0.0004	0.3920
PC 20	13.52	7.35	41.30	345	79	58	4.98	8.60	0.99	0.34	0.0150	0.0291	0.1965	0.0060	0.4480
PC 21	56.04	7.66	66.10	1600	1600	68	9.95	7.50	9.18	0.66	0.0249	0.0841	0.5715	0.0007	0.5600
PC 22	374.35	7.88	61.60	1600	1600	60	9.95	8.25	3.48	0.43	0.0125	0.0399	0.2143	0.0007	0.7840
PC 23	55.74	7.77	56.70	1600	920	60	4.98	8.05	5.72	0.58	0.0224	0.0280	0.9644	0.0011	0.4200
PC 24	384.08	7.92	59.10	1600	1600	55	24.82	8.10	2.77	0.58	0.0237	0.0658	0.3929	0.0014	0.3080
PC 25	225.75	8.18	126.50	1600	1600	160	37.23	7.15	29.50	6.39	0.2506	0.3095	0.7144	0.0341	2.1000
PC 26	619.32	8.02	79.50	1600	1600	83	14.89	7.50	15.50	2.68	0.0998	0.1467	0.4108	0.0269	1.3440
PC 27	387.94	7.80	66.40	1600	920	75	4.98	7.80	6.93	1.30	0.0212	0.1089	0.3390	0.0007	0.8120
PC 28	30.24	7.67	61.30	1600	1600	78	4.91	7.95	2.32	1.27	0.0187	0.0539	0.3929	0.0007	1.1760
PC 29	22.60	7.61	53.80	1600	1600	68	4.83	7.90	3.27	1.53	0.0262	0.0723	0.3929	0.0007	1.3720
PC 30	18.35	7.58	57.40	1600	1600	78	4.91	8.00	1.32	1.34	0.0162	0.0819	0.4286	0.0011	1.3160
PC 31	3.45	7.65	57.80	1600	1600	188	9.82	7.80	93.02	1.59	0.0137	0.0582	0.4286	0.0047	1.4000
PC 32	43.21	8.12	148.90	1600	920	105	4.91	7.70	3.85	1.44	0.0399	0.0572	0.5179	0.0014	1.0920
PC 33	687.51	7.98	87.10	1600	1600	95	4.91	7.00	19.60	1.61	0.0586	0.1359	0.4108	0.0018	1.1480
PC 34	10.40	7.20	56.30	1600	1600	100	14.74	7.70	12.71	2.22	0.0711	0.0884	0.4822	0.0054	1.2040
PC 35	23.37	7.43	66.90	1600	1600	100	12.29	7.60	22.60	1.68	0.0224	0.0572	0.1250	0.0025	1.0920
PC 36	43.08	8.20	142.50	1600	1600	143	2.46	8.00	3.47	0.69	0.0125	0.0830	0.3929	0.0011	1.4840

Tabla 2. Resumen de variables (continuación)

ID	Q (l/s)	pH	C (μ S/cm)	Coliformes Totales (NMP)	Coliformes Fecales (NMP)	Sólido totales (mg/l)	DQO (mg/l)	OD (mg/l)	Turbiedad (mg/l)	DBO (mg/l)	Fosfatos (mg/l)	Fósforo total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)	Nitrógeno total (mg/l)
PC 37	1.09	7.89	288.00	1600	1600	310	2.46	6.40	57.80	3.77	1.1350	1.2770	0.4822	0.0022	1.5120
PC 38	42.77	7.74	102.80	1600	542	75	41.75	7.60	3.34	0.33	0.0075	0.0647	5.9650	0.5346	1.4800
PC 39	9.86	8.10	116.90	1600	1600	90	2.46	7.60	11.28	0.52	0.0710	0.0917	0.4108	0.0075	1.3720
PC 40	181.93	8.15	129.50	1600	1600	125	7.26	7.70	7.69	0.11	0.0823	0.2300	0.5360	0.0040	1.6520
PC 41	9.60	7.73	43.00	1600	1600	73	24.20	7.90	17.60	0.41	0.0150	0.0539	0.2680	0.0022	1.5120
PC 42	6.14	7.93	94.00	1600	1600	95	12.10	7.25	15.84	0.28	0.2340	0.2430	1.8750	0.0014	1.2880
PC 43	823.71	8.04	80.30	1600	1600	133	14.52	7.25	70.31	1.84	0.0860	0.1390	0.4108	0.0100	1.1200
PC 44	23.48	8.06	191.70	1600	1600	150	21.78	7.10	16.80	4.37	0.2360	0.2430	0.2143	0.0118	1.1200
PC 45	672.20	7.99	85.50	1600	1600	155	7.25	7.80	19.60	0.54	0.1160	0.1230	0.5180	0.0040	1.4000
PC 46	12.90	8.01	138.40	1600	1600	83	7.27	7.95	13.81	0.63	0.1460	0.2050	1.9820	0.0050	1.1200
PC 47	754.32	8.04	86.70	1600	1600	203	16.91	7.90	1.28	0.56	0.1520	0.1600	0.4110	0.0029	1.4000
PC 48	25.65	8.19	150.80	1600	426	113	11.97	8.00	18.00	0.33	0.0723	0.0895	0.6070	0.0011	1.5400
PC 49	19.55	8.40	136.70	1600	109	113	11.97	7.80	17.80	0.36	0.6320	0.7750	0.5180	0.0007	0.9800
PC 50	16.19	8.24	146.70	1600	109	85	0.12	6.80	5.74	0.46	0.7060	0.7140	0.5360	0.0014	1.6800
PC 51	34.34	7.82	303.00	1600	1600	300	7.65	7.55	59.20	29.91	0.9020	1.5700	0.3930	0.0079	6.4400
PC 52	7.51	7.89	87.20	1600	1600	78	9.54	7.55	4.49	0.54	0.0349	0.4012	0.5710	0.0025	1.2600
PC 53	19.54	7.87	84.40	1600	1600	93	7.16	7.75	5.90	0.43	0.0175	0.0992	0.5180	0.0025	1.1200
PC 54	989.27	8.02	89.80	1600	1600	115	9.54	8.30	17.19	1.07	0.0648	0.3070	0.4460	0.0018	1.1200
PC 55	14.24	8.08	136.40	1600	1600	145	21.48	7.70	3.24	1.39	0.1600	0.2440	1.3570	0.0097	1.6800
PC 56	1.42	7.88	279.00	1600	1600	198	19.09	7.30	5.32	5.26	0.2420	0.3560	4.0540	0.2931	1.2600
PC 57	3.55	7.83	131.80	1600	1600	175	4.95	8.40	2.39	0.71	0.1550	0.2380	0.2090	0.0438	1.4000
PC 58	621.38	7.99	89.90	1600	1600	130	14.11	8.40	22.70	1.80	0.0873	0.1900	0.3750	0.0032	0.8400
PC 59	16.63	8.00	141.40	1600	1600	143	14.86	8.10	5.05	1.47	0.1690	0.2010	1.1430	0.0405	1.6800
PC 60	287.91	7.93	104.00	1600	1600	128	19.81	7.75	25.40	1.47	0.1970	0.2570	0.6960	0.0133	0.9800
PC 61	9.73	7.87	101.80	1600	1600	125	4.95	7.65	20.10	0.97	0.2340	0.3360	0.8750	0.0018	1.4000
PC 62	327.12	7.94	109.00	1600	1600	108	16.46	8.25	13.81	2.41	0.1890	0.2990	0.6960	0.0223	1.6800
PC 63	5.43	7.58	128.70	1600	1600	140	18.86	8.50	2.46	1.51	0.1770	0.3860	0.8570	0.0029	0.5600
PC 64	24.52	7.88	118.50	1600	1600	143	16.51	7.60	5.86	1.14	0.1320	0.3660	1.1430	0.0456	2.1000
PC 65	36.79	8.42	193.00	1600	1600	163	25.94	9.00	19.97	4.82	0.1200	0.4550	1.0540	0.1540	0.5600
PC 66	1.63	7.74	162.60	1600	1600	130	21.22	8.50	18.10	1.60	0.0474	0.1920	1.3390	0.0229	0.7000
PC 67	3.87	7.97	134.30	1600	1600	113	11.79	8.20	2.49	1.18	0.0549	0.1290	0.6250	0.0025	0.7000
PC 68	6.10	7.07	106.60	1600	1600	103	17.23	8.30	5.71	1.07	0.0349	0.1560	0.9640	0.0083	0.2800
PC 69	15.83	7.78	144.10	1600	1600	130	32.42	7.70	2.96	1.50	0.1271	0.1780	1.1610	0.0657	0.2800
PC 70	21.33	8.34	162.90	1600	1600	170	9.28	8.50	2.09	2.98	0.1546	0.3490	1.0540	0.0097	0.4200
PC 71	9.60	7.88	102.80	1600	175	100	6.96	8.55	1.53	0.79	0.0224	0.0906	0.8570	0.0011	0.5600
PC 72	8.27	7.82	128.50	1600	1600	123	9.28	8.30	3.87	1.09	0.0574	0.1801	0.5890	0.0025	0.2800

Tabla 2. Resumen de variables (continuación)

ID	Q (l/s)	pH	C (μ S/cm)	Coliformes Totales (NMP)	Coliformes Fecales (NMP)	Sólidos totales (mg/l)	DQO (mg/l)	OD (mg/l)	Turbiedad (mg/l)	DBO (mg/l)	Fosfatos (mg/l)	Fósforo total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)	Nitrógeno total (mg/l)
PC 73	7.45	7.55	170.00	1600	1600	140	13.92	6.90	0.89	2.16	0.2419	0.5695	1.8930	0.0904	0.7000
PC 74	3.90	7.45	173.90	1600	1600	185	42.70	6.05	15.57	5.62	0.4560	0.8760	0.2860	0.0348	0.7000
PC 75	0.41	6.71	59.10	1600	1600	88	10.05	7.05	19.91	0.55	0.0212	0.1240	0.6790	0.0090	0.7000
PC 76	11.88	7.73	97.00	1600	1600	95	10.05	8.15	1.36	0.94	0.0574	0.1030	0.5360	0.0061	0.5600
PC 77	73.30	7.91	249.00	1600	1600	158	45.03	6.70	46.10	8.75	0.3850	1.2123	0.9110	0.0283	2.9410
PC 78	15.03	7.73	66.30	1600	1600	108	13.04	7.85	32.20	1.22	0.0362	0.0528	0.8560	0.0004	2.2410
PC 79	991.57	7.94	79.70	1600	1600	98	22.81	8.10	22.80	2.15	0.0885	0.1219	0.7500	0.0007	6.3030
PC 80		7.97	95.50	1600	1600	110	9.78	9.30	30.40	4.03	0.1580	0.2319	0.7500	0.0022	4.4520
PC 81	8.64	7.77	157.80	1600	1600	125	22.81	7.30	5.26	6.65	0.2110	0.3387	1.0180	0.0434	3.7820
PC 82	129.41	8.04	129.70	1600	1600	273	18.82	8.50	287.00	2.84	0.0586	0.1963	0.8040	0.0007	3.7820
PC 83		8.07	126.70	1600	1600	123	11.85	8.40	46.40	4.48	0.1030	0.2589	0.7320	0.0086	1.8210
PC 84	12.70	7.69	77.20	160000	160000	418	16.59	8.70	504.00	2.18	0.0786	0.3559	0.7680	0.0011	1.6810
PC 85	10.59	8.59	224.00	160000	160000	1500		7.60	1000.00	49.10	0.5960	1.3460	1.1070	0.0021	3.3620
PC 86		8.20	123.60	160000	160000	120	14.22	7.40	20.30	6.34	0.1850	0.2770	0.7320	0.0036	2.1010
PC 87	120.76	7.99	547.00	160000	160000	530		3.50	150.00		1.9230	2.6210	0.7320	0.0068	20.8700
PC 88	69.92	7.99	780.00	160000	160000	858		4.40	196.00		2.3400	6.0500	0.5360	0.0097	29.8340
PC 89	33.54	7.55	110.50	1600	1600	110	9.54	7.50	5.64	1.11	0.0810	0.4490	1.1970	0.0438	2.1010
PC 90	0.74	7.82	127.90	1600	1600	168	18.96	6.95	8.88	7.34	0.2150	1.1430	0.8390	0.0018	2.6610
PC 91	969.08	7.19	167.30	1600	1600	170	54.51	6.70	5.92	5.73	0.1250	0.3970	0.9470	0.0029	4.4820
PC 92	4.20	7.89	157.50			183	56.74	8.25	24.60	6.93	0.4440	1.2490	0.7140	0.0050	3.5020
PC 93	41.72	7.83	70.30	160000	160000	70	54.37	7.75	63.40	0.80	0.0436	0.2500	0.7140	0.0007	2.2410
PC 94		7.91	121.20	1600	1600	145	28.37	7.55	14.00	8.37	0.2170	0.4590	0.7680	0.0007	2.1010
PC 95		7.40	160.90	1600	1600	168	56.74	5.00	28.60	11.79	0.4003	0.8390	0.7500	0.0172	5.0420
PC 96	62.22	7.50	265.00	1600	1600	360	88.26	4.50	92.50	7.59	0.8870	1.5250	0.8570	0.0039	7.0030
PC 97		7.28	197.00	1600	1600	188	44.92	6.15	25.40	6.93	0.3000	0.4500	1.0180	0.0039	4.7620
PC 98	27.02	7.81	197.10	1600	1600	183	33.10	7.55	17.70	4.47	0.3880	1.1580	0.5000	0.0029	3.2220
PC 99		7.23	179.10			218	62.19	6.75	4.95	14.89	0.6910	1.2560	0.6430	0.0097	3.2220
PC 100		7.08	150.00	16000000	390000	168		8.40	18.90	17.32	0.3000	0.7820	0.5710	0.0090	4.6220
PC 101		7.07	170.00	16000000	175000	173		5.75	9.08	22.00	0.2170	0.7120	0.5540	0.0086	2.9410
PC 102	14.15	7.08	360.00	16000000	92000	300		3.00	22.30	31.63	0.8670	4.8540	0.3570	0.0201	2.5210
PC 103	3.90	7.08	88.20	1600	1600	145	9.19	8.10	20.60	8.43	0.0411	0.1186	0.8750	0.0004	3.6420
PC 104	2.64	7.15	47.50	1600	1600	120	11.49	8.20	31.20	8.43	0.0399	0.2718	0.1430	0.0007	8.6840
PC 105		7.17	135.60	1600	1600	150	9.19	8.65	3.13	7.53	0.1010	0.1359	0.2320	0.0007	3.3620
PC 107	0.70	7.11	100.50	1600	1600	313	13.79	7.40	80.20	7.17	0.0810	0.1985	0.4640	0.0011	3.9220
PC 108	9.17	7.86	166.90	1600	1600	155	15.00	6.80	7.77	4.80	0.1830	0.4600	0.8040	0.0320	3.7820
PC 109	6.81	8.12	109.40	1600	1600	135	10.00	7.20	15.90	3.17	0.1430	0.1760	0.3570	0.0007	3.2220
PC 110	656.86	7.40	178.50	1600	1600	205	86.67	2.90	40.70	72.05	0.2290	1.3300	0.6250	0.0258	4.2020

Tabla 3. Factores de ponderación NSF

 Fuente; Tomada de http://www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp

Parámetro	Factor W_i
% Saturación de oxígeno	0,17
Coliformes fecales	0,16
PH	0,11
Demanda bioquímica de oxígeno	0,11
Nitratos	0,10
Fosfatos	0,10
Temperatura ΔT	0,10
Turbiedad	0,08
Sólidos totales	0,07

Teniendo en cuenta el número de puntos de medición definidos en la cuenca y lo complejo que resulta obtener los factores de escala Q_i directamente de los diagramas, se han elaborado ajustes polinómicos a las curvas de

estandarización asociadas a cada variable. En la Tabla 4 se muestran los ajustes propuestos, que a su vez se muestran superpuestos en los diagramas originales de la NSF en (Figura 3).

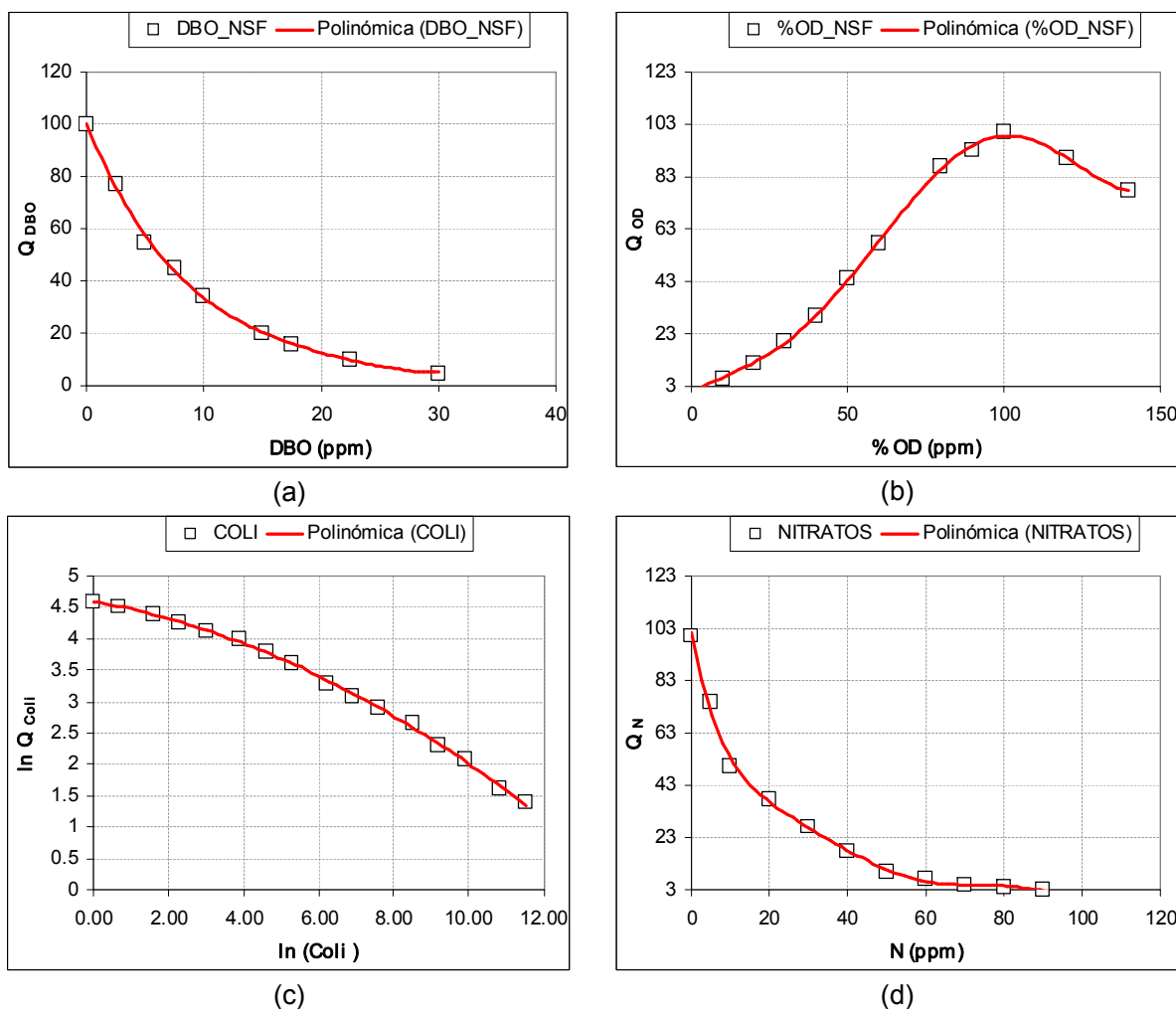
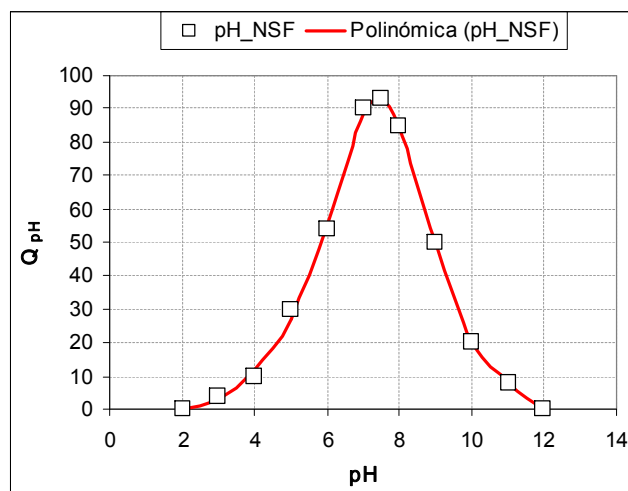
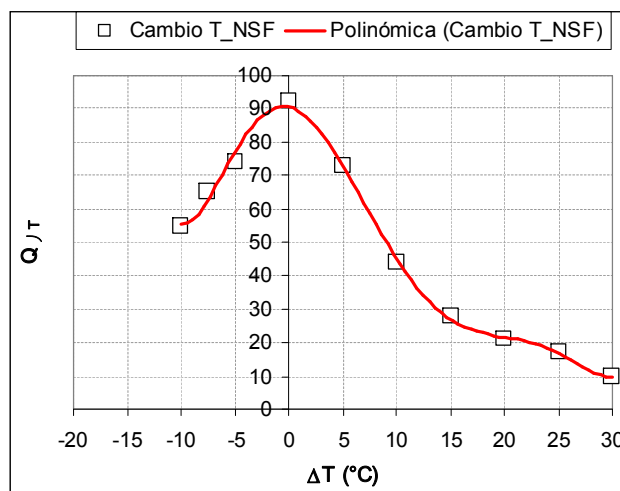


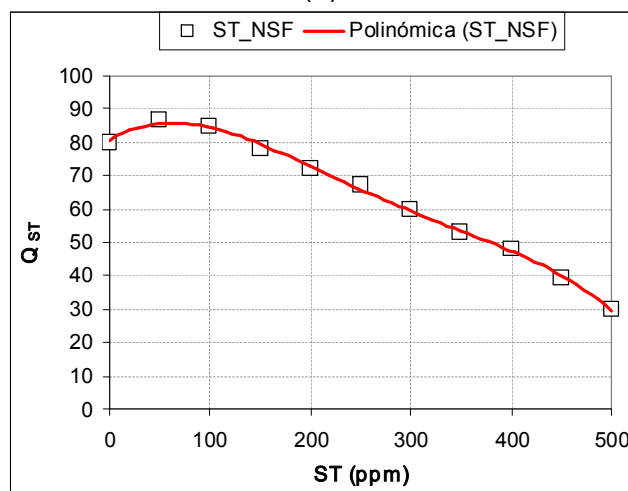
Figura 3. Factores de escala, Q para los parámetros involucrados en el WQI_{NSF} : (a) demanda bioquímica de oxígeno; (b) porcentaje de saturación de oxígeno; (c) coliformes fecales; (d) nitratos;



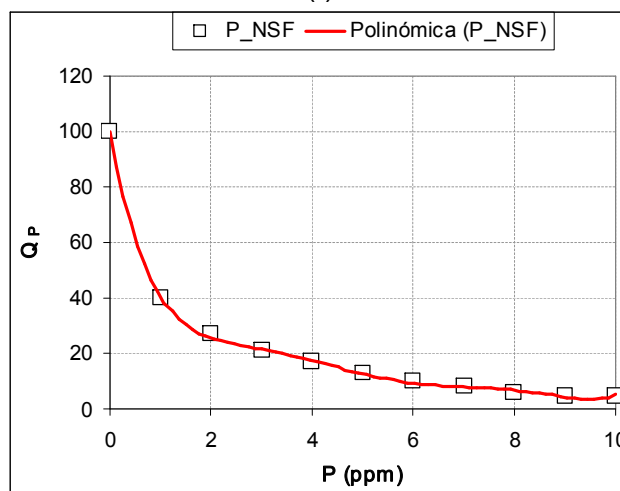
(e)



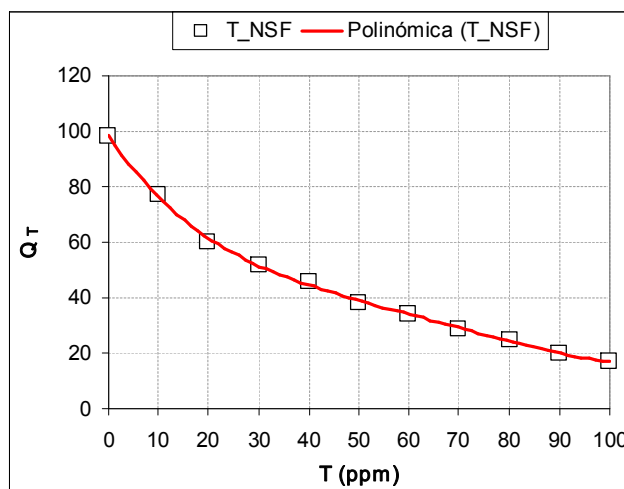
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 3. (Continuación) Factores de escala Q para los parámetros involucrados en el WQI_{NSF} : (e) pH; (f) cambio de temperatura; (g) sólidos totales; (h) fósforos.

Tabla 4. Ajuste de curvas para determinación de factores de escala Q_i

PARÁMETRO	AJUSTE
% Saturación de oxígeno	$Q_{OD} = 3,1615E-08(OD\%)^5 - 1,0304E-05(OD\%)^4 + 1,0076E-03(OD\%)^3 - 2,7883E-02(OD\%)^2 + 8,4068E-01(OD\%) - 1,6120E-01$ $R^2 = 0,9995$ donde Q_{OD} : Factor de escala Oxígeno disuelto - OD%: Oxígeno disuelto expresado como porcentaje de saturación
Demanda bioquímica de oxígeno ó Demanda química de oxígeno	$Q_{DBO} = 1,8677E-04(DBO)^4 - 1,6615E-02(DBO)^3 + 5,9636E-01(DBO)^2 - 1,1152E+01(DBO) + 1,0019E+02$ $R^2 = 0,9989$ donde Q_{DBO} : Factor de escala demanda bioquímica de oxígeno - DBO: demanda bioquímica de oxígeno en mg/l
Coliformes fecales	$\ln(Q_{Coli}) = -0,0152(\ln C)^2 - 0,1063(\ln C) + 4,5922$ $R^2 = 0,999$ donde Q_{Coli} : Factor de escala coliformes fecales - C: Coliformes fecales como NMP
Nitratos	$Q_{Nitra} = 3,5603E-09N^6 - 1,2183E-06N^5 + 1,6238E-04N^4 - 1,0693E-02N^3 + 3,7304E-01N^2 - 7,5210N + 1,0095E+02$ $R^2 = 0,9972$ donde: Q_{Nitra} : Factor de escala Nitratos - N: Concentración de Nitratos en mg/l
pH	<u>Para pH < 7,5</u> $Q_{pH} = -0,1789pH^5 + 3,7932pH^4 - 30,517pH^3 + 119,75pH^2 - 224,58pH + 159,46$ $R^2 = 0,9981$ <u>Para pH > 7,5</u> $Q_{pH} = -1,11429pH^4 + 44,50952pH^3 - 656,60000pH^2 + 4215,34762pH - 9840,14286$ $R^2 = 1,0000$ donde Q_{pH} : Factor de escala pH - pH: Nivel de pH
Cambio de temperatura	$Q_{\Delta T} = 1,9619E-06\Delta T^6 - 1,3964E-04\Delta T^5 + 2,5908E-03\Delta T^4 + 1,5398E-02\Delta T^3 - 6,7952E-01\Delta T^2 - 6,7204E-01\Delta T + 9,0392E+01$ $R^2 = 0,9972$ donde: $Q_{\Delta T}$: Factor de escala Cambio de Temperatura - ΔT : Cambio de temperatura en °C
Sólidos totales	$Q_{ST} = -4,4289E-09ST^4 + 4,650E-06ST^3 - 1,9591E-03ST^2 + 1,8973E-01ST + 8,0608E+01$ $R^2 = 0,9977$ donde: Q_{ST} : Factor de escala Sólidos Totales - ST: Sólidos totales en mg/l
Fosfatos	$Q_P = 4,67320E-03P^5 - 1,61670E-01P^4 + 2,20595P^3 - 1,50504E+01P^2 + 5,38893E+01P - 9,98933E+01$ $R^2 = 0,9994$ donde: Q_P : Factor de escala Fosfatos - P: Fosfatos en mg/l
Turbiedad	$Q_T = 1,8939E-06T^4 - 4,9942E-04T^3 + 4,9181E-02T^2 - 2,6284T + 9,8098E+01$ $R^2 = 0,9990$ donde: Q_T : Factor de escala Turbiedad - T: Turbiedad en mg/l

Para la estimación de los factores presentados en la Tabla 4 se hicieron las siguientes consideraciones:

- Teniendo en cuenta que la variabilidad de la temperatura del agua se encuentra influenciada por la hora a la cual fue tomada la muestra y no hubo simultaneidad en las mediciones, se asumió un cambio DT nulo en cualquier parte de la cuenca al cual corresponde un factor de escala $Q_{DT} = 90$.

- El aporte del oxígeno disuelto en el índice WQI_{NSF} viene dado en términos del porcentaje de saturación, que depende de parámetros como la temperatura, salinidad y presión atmosférica en el cuerpo de agua. Sólo el efecto de la temperatura del agua ha sido tenido en cuenta para estimar el nivel de oxígeno de saturación, O_{sf} (mg/l), de acuerdo (Chapra, 1997):

$$\ln(O_{sf}) = -1393441 + \frac{1,5757 \times 10^5}{T_{agua}} - \frac{6,6423 \times 10^7}{T_{agua}^2} + \frac{1,2438 \times 10^{10}}{T_{agua}^3} - \frac{8,621949 \times 10^{11}}{T_{agua}^4} \quad (2)$$

donde:

$$T_{agua} = T(^{\circ}C) + 273,15 \quad (3)$$






Temperatura absoluta en grados Kelvin

- El índice de calidad de aguas de la NSF fue desarrollado incluyendo como uno de sus parámetros la DBO por ser un indicador del contenido de materia orgánica presente en la fuente de agua, sin embargo, en

alrededor del 61 % de los puntos de muestreo de la cuenca los niveles de la DBO no sobrepasaron 2 mg/l para el escenario de muestreo, valor típico de aguas con bajos niveles de contaminación por materia orgánica biodegradable (Chapman, 1992). Por su parte, la DQO sí refleja concentraciones considerables. Por esta razón, se consideró no sólo el material biodegradable sino también el biológicamente resistente en la estimación del índice de calidad de agua WQI_{NSF} . La obtención del factor de escala para la DQO se hizo empleando la misma curva ajustada para la DBO (Tabla 4).

Una vez determinado el índice WQI_{NSF} en cualquier punto, puede clasificarse la fuente de acuerdo con los intervalos señalados en la Tabla 5.






Tabla 5. Clasificación de calidad de agua en función del índice WQI_{NSF}

VALOR DEL ÍNDICE	CLASIFICACIÓN	LEYENDA
0 - 25	Calidad muy mala (MM)	
26 - 50	Calidad mala (M)	
51 - 70	Calidad media (R)	
71 - 90	Calidad buena (B)	
91 - 100	Calidad excelente (E)	

Una de las limitaciones del índice WQI_{NSF} es que ha sido desarrollado como una herramienta para caracterizar en forma general la calidad de las aguas, de tal forma que procesos físicos, químicos o biológicos que indican alta degradación de las aguas pueden ser enmascarados por otros que no sugieren contaminación alguna (o mínima). Buscando superar dichas limitaciones. Ramírez et al. (1997) han propuesto cuatro índices de contaminación (ICO) construidos mediante análisis de componentes

principales, el cual tiene como propósito reducir un espacio multivariado de numerosas variables a sólo unas componentes que explican un alto porcentaje de la varianza total (Ramírez et al., 1997). A diferencia del índice WQI_{NSF} , los ICO tienen un rango de variación entre 0 y 1, donde 0 denota baja contaminación y 1 alta contaminación. En la Tabla 6 se describe la asignación de dichos valores.

Tabla 6. Clasificación de calidad de agua en función de índices de contaminación

Valor de los índices	Clasificación	LEYENDA
0.8 – 1.0	Contaminación muy alta	
0.6 – 0.8	Contaminación alta	
0.4 – 0.6	Contaminación media	
0.2 – 0.4	Contaminación baja	
0.0 – 0.2	Contaminación muy baja	

A continuación se describen los índices de contaminación empleados:

- ICOMI: Índice de contaminación por mineralización; incluye variables como conductividad, dureza, alcalinidad entre otros. Es el valor promedio de los índices de cada una de las 3 variables elegidas, las cuales se definen en un rango de 0 – 1.

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I_{Conductividad} + I_{Dureza} + I_{Alcalinidad}) \quad (4)$$

donde:

$$Ln(I_{Conductividad}) = -3.26 + 1.34 Ln[Conductividad(\mu S/cm)] \quad (5)$$

$$Ln(I_{Dureza}) = -9.09 + 4.40 Ln[Dureza(g/m^3)] \quad (6)$$

$$I_{Alcalinidad} = -0.25 + 0.005 Alcalinidad(g/m^3) \quad (7)$$

- ICOMO: Índice de Contaminación por Materia Orgánica; incluye variables como Oxígeno, DBO₅, y Coliformes Totales y Fecales. Al igual que el ICOMI, este índice es el promedio de cada una de las variables elegidas.

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO} + I_{Coliformes\ totales} + I_{Oxígeno\ %}) \quad (8)$$

donde:

$$I_{DBO} = -0.05 + 0.70 Log_{10}[DBO(g/m^3)] \quad (9)$$

$$I_{COL\ TOT} = -1.44 + 0.56 Log_{10}[Col\ Tot(NMP)] \quad (10)$$

$$I_{Oxígeno\ \%} = 1 - 0.01 Oxígeno(\%) \quad (11)$$

- ICOSUS: Índice de Contaminación por Sólidos Suspendedos.

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 sólidos\ suspendidos(g/m^3) \quad (12)$$

Sólidos suspendidos por encima de 340 g/m³ tienen ICOSUS=1

Sólidos suspendidos por debajo de 10 g/m³ tienen ICOSUS=0

- ICOTRO: Índice de Contaminación Trófico; Se fundamenta en la concentración del fósforo total, el cual define por si mismo una categoría discreta a saber:

<i>Oligotrófico</i>	< 0.01	(g/m ³)	(13)
<i>Mesotrófico</i>	0.01 – 0.02	(g/m ³)	
<i>Eutrófico</i>	0.02 – 1	(g/m ³)	
<i>Hipereutrófico</i>	> 1	(g/m ³)	

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de aplicar el método propuesto por la NSF se ha estimado el valor del índice WQI_{NSF} en los diferentes puntos de muestro sobre la cuenca. En la Figura 4b se muestra esquemáticamente dicho valor de acuerdo con la clasificación indicada en la Tabla 5, donde puede observarse que las condiciones más favorables de calidad del agua (Calidad Buena) aparecen en mayor proporción en la parte alta de la cuenca, aunque se aprecian condiciones similares en algunos puntos de la parte media y baja de la misma donde resaltan condiciones de Calidad Media. Este comportamiento no se aprecia claramente si se emplea la DBO en la agregación del índice (Figura 4a), de ahí la relevancia de sustituir dicha variable por la DQO registrada en cada punto de muestreo.

Es importante resaltar que los altos niveles de oxígeno disuelto encontrados en la cuenca, que alcanza valores de hasta 8 mg/l aún en la parte baja de la cuenca donde se hacen importantes aportes de aguas residuales domésticas e industriales, se convierten en una de las principales falencias del índice WQI_{NSF} , si se quiere implementar en cuencas de alta pendiente ya que tienden a sobrevalorarlo en los distintos puntos de muestreo. Casos similares se han encontrado en el río Medellín, al cual confluye la quebrada Doña María, en el cual a pesar de recibir todas las aguas servidas (con y sin tratamiento previo) del área metropolitana, se encuentran concentraciones de oxígeno apreciables inducidas por la geomorfología del cauce y las numerosas obras de disipación de energía construidas en su recorrido (UNALMED et al., 2004). Así mismo, en la quebrada La Rosa, localizada en el municipio de Medellín, se encontraron concentraciones extremadamente altos de oxígeno, incluso superiores al 90% del porcentaje de saturación; dicho comportamiento fue constante en cuatro monitoreos realizados sobre la corriente lo cual se atribuyó a la oxigenación que el agua tiene en la parte alta de la cuenca, ocasionada por pendientes incluso superiores al 40% (AMVA et al., 2004).

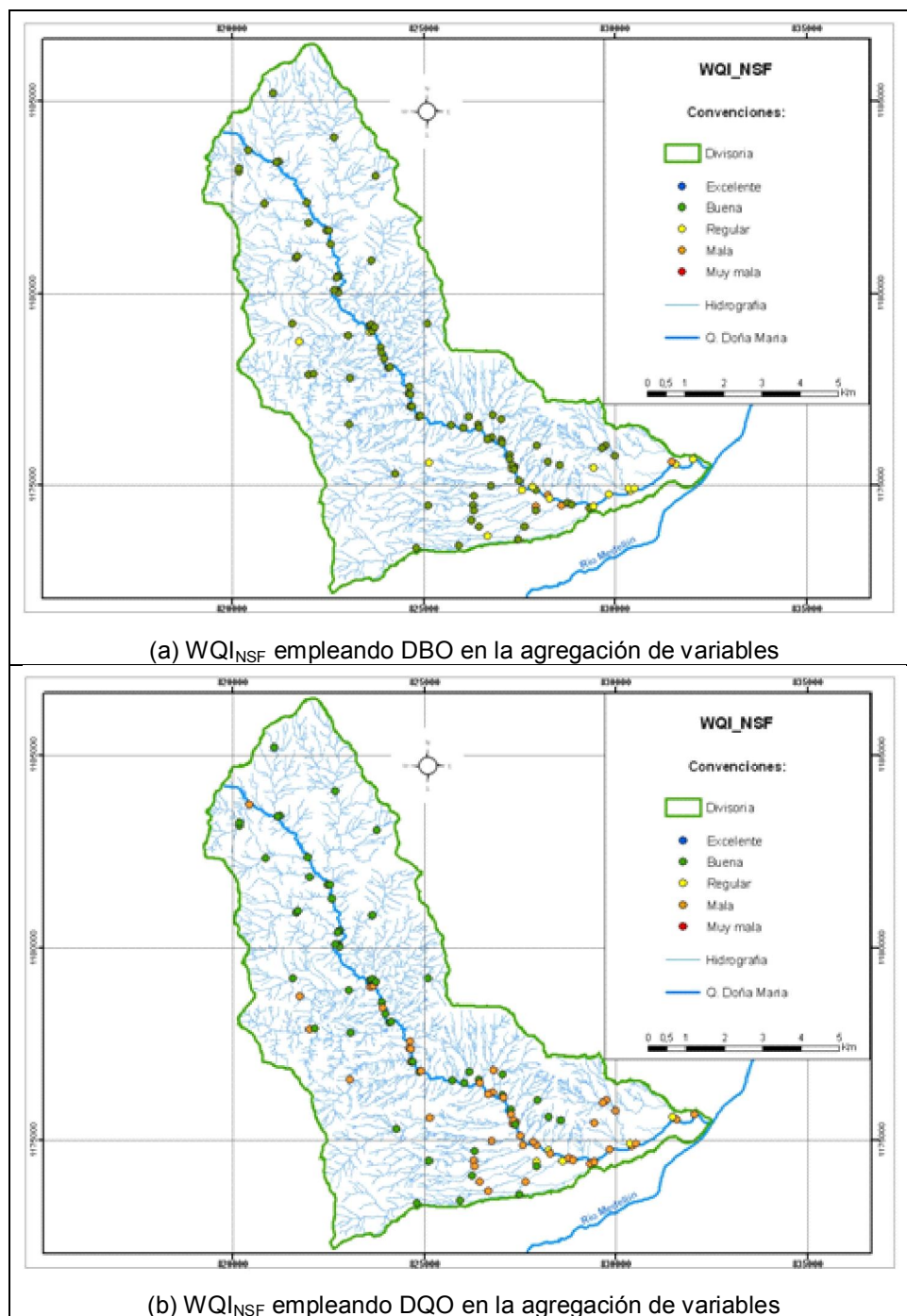


Figura 4. Clasificación de la calidad del agua según WQI en la cuenca de la quebrada Doña María.

En la Figura 5 a la Figura 8 se muestra la variabilidad espacial de los distintos índices de contaminación sugeridos por Ramírez et al. (1997), clasificada en cinco intervalos entre 0 y 1; como ya se mencionó 0 denota bajos niveles de contaminación desde el punto de vista de las variables involucradas en el índice y 1 altos niveles de contaminación. Cabe anotar que la clasificación de

estos índices fue concebida teniendo en cuenta umbrales propuestos tanto a nivel nacional como internacional.

El índice ICOTRO (Figura 5) refleja niveles eutróficos de fósforo en el 88% (92 puntos) de los puntos de muestreo, característica que puede generalizarse a lo largo de toda la cuenca. Por su parte, la variación espacial del

ICOMI (Figura 6) es un reflejo directo de los niveles de conductividad eléctrica encontrados, ya que no fueron tenidos en cuenta otros parámetros como alcalinidad y dureza en su estimación. En la parte alta de la cuenca, donde las conductividades eléctricas registradas se encuentran por debajo de 125 mS/cm, se observan mayores niveles de mineralización en las corrientes tributarias localizadas en la margen derecha de la quebrada Doña María, en tanto que en las veredas El Astillero y el Salado (margen izquierda) se tienen los menores niveles de mineralización. Hacia la parte baja

de la cuenca dicho patrón se conserva con mayores niveles de mineralización en las veredas El Salado (margen derecha), La Montañita, Potrerito y San Antonio de Prado. Sin embargo, cabe anotar que en la mayor parte de los sitios de muestreo los niveles de mineralización se encuentran por debajo límites establecidos como aptos incluso para consumo humano cuando otros parámetros también lo son, y que la mayor parte de los puntos de muestreo poseen índices ICOMI próximos a cero.

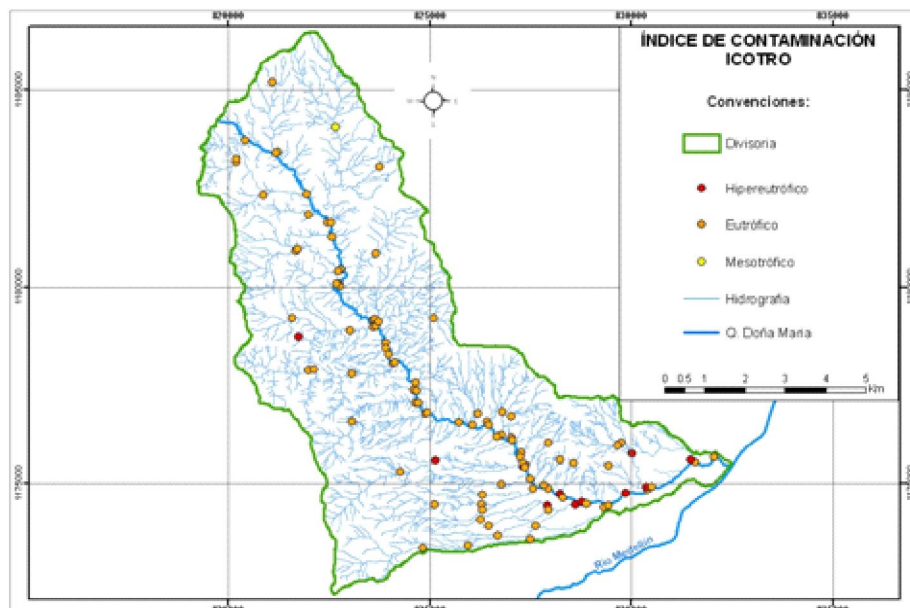


Figura 5. Índice de contaminación trófico.

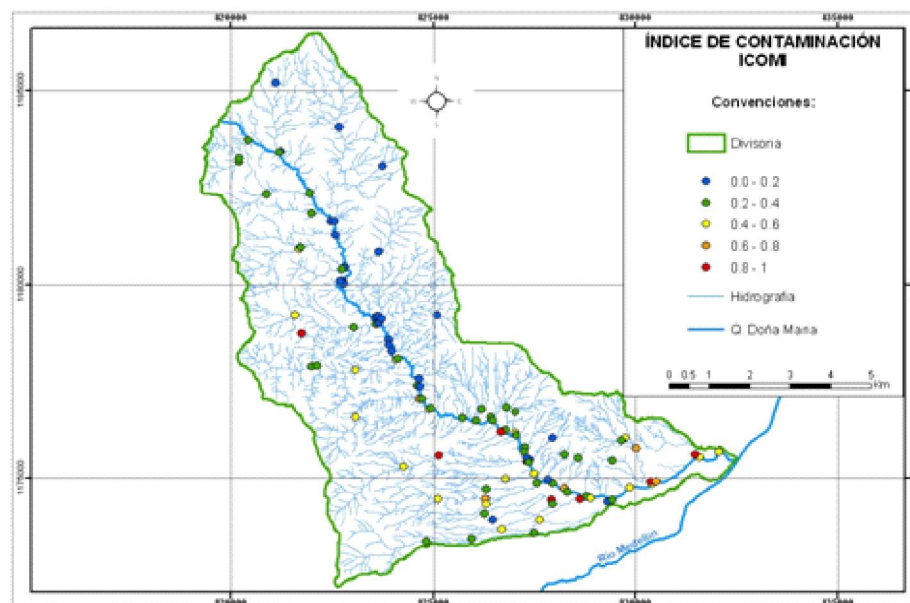


Figura 6. Índice de contaminación por mineralización.

La contaminación por materia orgánica cuantificada en términos del índice ICOMO (Figura 7) tiende a reflejar los mayores niveles de contaminación en la parte media y baja del cauce principal de la quebrada Doña María y en la parte más baja de las subcuencas tributarias en donde ya se han recogido todos los vertimientos puntuales o difusos. Además, en la parte alta de la cuenca en la vereda Yarumalito también se observan valores intermedios de este índice, producto de los altos niveles de Coliformes Totales encontrados. Los sólidos

suspendidos, necesarios en la estimación del índice de contaminación ICOSUS, fueron estimados indirectamente a partir de los valores de conductividad registrados. La variabilidad de este índice (Figura 8), al igual que la del ICOMI, es sólo el reflejo de los sólidos suspendidos estimados en cada uno de los puntos de muestreo, y su magnitud muestra que las mayores concentraciones de sólidos se encontraron en la parte media y baja de la cuenca para el periodo de medición.

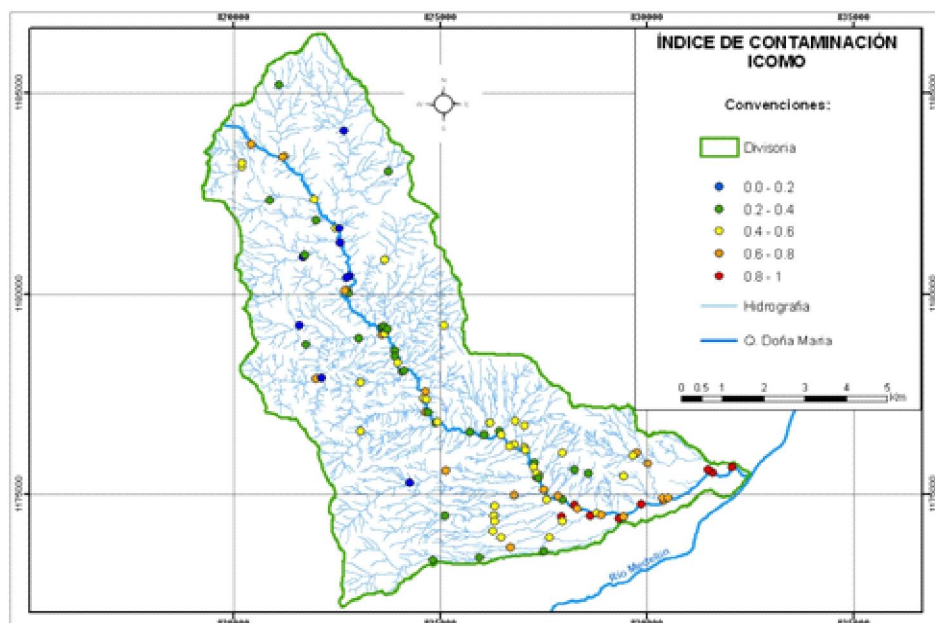


Figura 7. Índice de contaminación por materia orgánica.

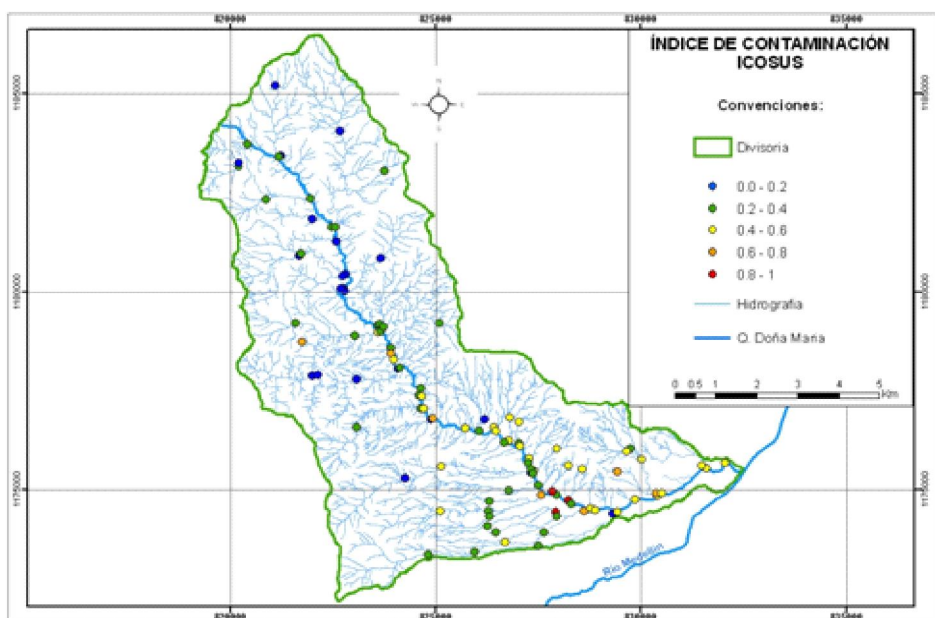


Figura 8. Índice de contaminación por materia sólidos suspendidos.

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este trabajo fueron obtenidos a partir de un único muestreo en los sitios de medición definidos en la cuenca, lo cual induce errores en la interpretación de los resultados dada la no simultaneidad de la información recopilada y a que dicho valor no representa las condiciones medias de las variables medidas de calidad de agua. Sin embargo, toda la información fue tomada en períodos de bajos regímenes de lluvia en la cuenca, permitiendo capturar en alguna medida la variabilidad espacial de dichas variables.

El índice de calidad de agua WQI_{NSF} no hace referencia al mecanismo de contaminación que sufren las fuentes de la cuenca lo cual sí hacen los índices de contaminación, ICO, a partir de los cuales pudo observarse que la contaminación por materia orgánica (ICOMO) es la más importante bajo el escenario de muestreo en el que se trabajó. A pesar de ello, nunca debe caracterizarse la calidad de las fuentes sin evaluar individualmente parámetros como DBO_5 , Nitrógeno Total, DQO, Sólidos y Nitratos, que corresponden a las variables más significativas en el escenario de muestreo de este trabajo.

Los niveles de mineralización (índice ICOMI) y de contaminación por materia orgánica (ICOMO) reflejaron las condiciones más críticas de la cuenca en la parte baja. Los índices ICOTRO e ICOSUS por su parte se hallan en intervalos medios a bajos en los niveles de contaminación (por debajo de 0,5) pero se espera que en condiciones de lluvia el transporte de sedimentos aumente y que mayor cantidad de nutrientes provenientes de prácticas agrícolas sea transportada por escorrentía como cargas difusas.

La caracterización de la calidad de las fuentes de la quebrada Doña María no debe involucrar el oxígeno disuelto como parámetro evaluador cuando se usen índices de calidad general como el WQI_{NSF} o índices de contaminación (ICO) como los propuestos por Ramírez et al. (1997) para materia orgánica (ambos desarrollados bajo diferentes condiciones), ya que las características hidráulicas de la quebrada (pendiente de los canales de flujo, saltos, pozos, etc.) inducen altas tasas de reaireación; sin embargo, la utilización de DQO en vez de DBO_5 puede compensar en alguna medida los favorables niveles de oxígeno encontrados, aunque al hacerlo se está manipulando la técnica de agregación propuestas para cada uno de los indicadores.

Aunque el escalamiento de los índices implementados es diferente, es decir, que la categorización del grado de contaminación es diferente, cabe resaltar las ventajas del ICOMO sobre el WQI_{NSF} ya que el primero, con solo tres parámetros involucrados en la técnica de agregación, explica lo que el WQI_{NSF} hace con los nueve parámetros en los que se fundamenta y, además, refleja la degradación de las aguas en la parte baja de la cuenca que resaltan variables como la DBO_5 .

5. BIBLIOGRAFIA

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) y Secretaría del Medio Ambiente del Municipio de Medellín, 2004. Formulación del plan de manejo de las microcuencas de las quebradas La Rosa y La Bermejuela ubicadas en la zona nororiental del municipio de Medellín. Medellín. Colombia.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UNALMED), 2006. Estudio para la reglamentación del aprovechamiento y uso de las aguas de la quebrada Doña María y sus afluentes. Medellín. Colombia.
- Bartram J. y Balance, R., 1996. Water quality monitoring. Published on behalf of United Nations Environment Programme World Health Organization. Gran Bretaña. 383 P.
- Chapman, D., 1992. Water quality assessments. Chapman & Hall. Gran Bretaña. 585 P.
- Chapra, S., 1997. Surface water-quality modeling. McGraw-Hill. New York. 844 P.
- Fernández, N. Ramírez, A. Y Solano, F., 1994. Physico - Chemical Water Quality Indices - A Comparative Review -. BISTUA, pp. 19 - 30.
- Krenkel, P. y Novotny, V., 1980. Water quality management. Academic Press. 671 P.
- Ministerio de Agricultura, 1984. Decreto 1594 de 1984. El cual establece los criterios de calidad de agua para la destinación del recurso hídrico y exige el desarrollo de los planes de ordenamiento del recurso por parte de las autoridades ambientales. Bogotá. Colombia.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2002. Decreto 1729 de 2002. Por el cual se reglamenta la ordenación del recurso hídrico. Bogotá. Colombia.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2005. Resolución 2145 de 2005. A través de la cual

se definen los objetivos de calidad de agua de la corriente, tramo o cuerpo de agua receptora de vertimientos. Bogotá. Colombia.

National Sanitation Foundation, 2006. URL: http://www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp.

Ramírez, A., Restrepo, R. y Viña, G., 1997. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales – Fórmulas y aplicación. Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 1, Num. 3, pp. 135 – 153.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín), 2004. Oferta y demanda hídrica en la subregión No. 1 del departamento de Risaralda con los municipios de Cartago y La Virginia. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín. Colombia.

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UN), Universidad de Antioquia (UdeA), Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Universidad de Medellín (UdeM) y Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), 2004. Diseño y Puesta en Marcha de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín en Jurisdicción del Área Metropolitana. Medellín. Medellín. Colombia.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (UN), Instituto Mi Río y CORANTIOQUIA, 2003. Aplicación de la Metodología de Formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas en la Parte Baja de la Cuenca de la Quebrada la Iguana, PIOM. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín. Colombia.

