



Evaluación de la calidad del agua subterránea utilizando el índice de calidad del agua (ICA). Caso de Estudio: Acuíferos de Maturín, Estado Monagas, Venezuela

Assessment of groundwater quality using water quality index. (WQI) Case study: Maturín Aquifers, Monagas State, Venezuela

José Alexander Gil-Marín^{1*}, Celeidys Vizcaino¹, Carlos Eduardo Veliz¹

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el índice de calidad del agua (ICA) en las aguas subterráneas de Maturín, estado Monagas, Venezuela, medido por el método del índice aritmético ponderado. Para ello, se evaluaron catorce parámetros de calidad del agua (temperatura, pH, dureza, conductividad eléctrica, nitratos, nitritos, sulfatos, cloruros, hierro, manganeso, potasio, sodio, fenoles y coliformes fecales). El peso relativo asignado a cada parámetro varió de uno a cuatro basado en la importancia del parámetro para la vida acuática. Los valores de ICA van desde 15,42 (Pozo 6) a 606,99 (Pozo 1). El impacto de varias actividades antropogénicas fue evidente en algunos parámetros como manganeso, nitritos, fenoles y coliformes fecales. Se sugiere que el monitoreo del acuífero es necesario para una gestión adecuada. La aplicación del ICA se recomienda como una herramienta muy útil que permite al público y a los responsables de la toma de decisiones, evaluar la calidad del agua subterránea en Venezuela.

Palabras clave: índice de calidad del agua, acuíferos, antropogénicas, Venezuela.

ABSTRACT

The goal of this research was to evaluate the water quality index (ICA) in the subway waters of Maturín, Monagas State, Venezuela, measured by the arithmetic weighted index method. For that purpose, fourteen water quality parameters were evaluated (temperature, pH, hardness, electrical conductivity, nitrates, nitrites, sulfates, chlorides, iron, manganese, potassium, sodium, phenols, and fecal coliforms). The relative weight assigned to each parameter varied from one to four based on the importance of the parameter to aquatic life. ICA values range from 15.42 (Well 6) to 606.99 (Well 1). The impact of various anthropogenic activities was evident in some parameters such as manganese, nitrites, phenols, and fecal coliforms. It is suggested that monitoring the aquifer is necessary for proper management. The application of ICA is recommended as a handy tool that allows the public and decision-makers to evaluate the quality of groundwater in Venezuela.

Keyword: water quality index; aquifers; anthropogenic; Venezuela.

¹Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agronómica, Maturín

*Autor de Correspondencia, e-mail: jalexgil2005@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural único ya que su cantidad total disponible a nivel mundial permanece constante en comparación con cualquier otro recurso renovable. Como componente del ciclo hidrológico, se consideran aguas subterráneas aquellas localizadas bajo la superficie del suelo (subsuelo), dentro de sus poros y entre las fisuras de las formaciones rocosas. Las aguas subterráneas se mueven a través de estratos permeables denominados acuíferos, desde zonas de recarga a zonas de descarga determinadas por entre las estructuras geológicas, poseen tasas de flujo lentas y tiempos de residencia largos, es decir, que la velocidad va desde 1 m/año a cientos de m/día (Duran, 2011). En Venezuela, la extracción hídrica total nacional para el 2008 alcanzó los 22,6 km³, destacando el sector agrícola con una extracción de 16,7 km³, equivalente al 74 por ciento del total de las extracciones. La extracción municipal alcanzó los 5,1 km³, o el 23 por ciento del total. El sector industrial alcanzó una extracción de 0,8 km³, o el 3 por ciento del total de las extracciones (MPPA, 2009). La sobreexplotación de aguas subterráneas más allá del límite sostenible en varias partes del país ha resultado en indeseados y progresivos agotamiento de sus niveles. Una rápida disminución de sus niveles podría reducir la producción agrícola en un porcentaje bastante significativo. Es un hecho bien conocido de que el agua pura es absolutamente esencial para una vida saludable. El suministro adecuado de agua pura es una necesidad básica para todos los humanos, sin embargo, se observa que millones de personas en todo el mundo son privadas de esta. Las consecuencias del urbanismo y la industrialización han causado el deterioro de la calidad del agua. La contaminación del agua potable puede ocurrir por filtración de tóxicos a través del suelo hasta el agua subterránea que se utiliza como fuente de agua potable. La calidad del agua subterránea se ve amenazada por la eliminación de residuos urbanos e industriales y productos químicos agrícolas. La tasa de agotamiento de sus niveles y el deterioro de su calidad son de preocupación inmediata en las

principales ciudades y pueblos del país. La calidad del agua es ciertamente afectada por la cantidad y calidad de los suministros procedentes de diferentes fuentes. Por lo tanto, en una planificación nacional general y gestión de recursos con respecto al agua, es necesaria la asignación de prioridades con énfasis en los diferentes usos. No es sorprendente que, debido a los factores anteriores, el estudio de la calidad del agua sea muy importante para mantener conciencia y comprensión de nuestro medio ambiente. El término calidad del agua fue desarrollado para dar una indicación de cuán adecuada es el agua para consumo humano (Vaux, 2001) y es ampliamente utilizado en múltiples publicaciones científicas relacionada con las necesidades de gestión sostenible.

La calidad del agua en un ecosistema acuático está determinada por muchos factores físicos, químicos y biológicos (Sargaonkar y Deshpande, 2003). Por lo tanto, un problema particular en el caso del monitoreo de la calidad del agua es la complejidad asociada con el análisis de la gran cantidad de variables medidas (Boyacioglu, 2006), y la alta variabilidad debido a los efectos antropogénicos e influencias naturales (Simeonov *et al.*, 2002).

Existen varios métodos para analizar los datos de calidad del agua que varían según los objetivos informativos, el tipo de muestras y el tamaño del área de muestreo. La investigación en esta área ha sido extensa, como lo indica la cantidad de métodos propuestos o desarrollados para la clasificación, modelado e interpretación de los datos de monitoreo (Simeonov *et al.*, 2002; Boyacioglu y Boyacioglu, 2007). Una de las formas más efectivas de comunicar información sobre las tendencias de calidad del agua es mediante el uso de los índices adecuados (Dwivedi y Pathak, 2007). Los índices se basan en los valores de varios parámetros fisicoquímicos y biológicos en una muestra de agua. El uso de índices en los programas de monitoreo para evaluar la salud del ecosistema tiene el potencial de informar al público en general y a los responsables de la toma de decisiones sobre el estado del ecosistema (Nasirian, 2007; Simoes *et al.*, 2008).

Este enfoque también puede ayudar a proporcionar un punto de referencia para evaluar los éxitos y fracasos de las estrategias de gestión para mejorar la calidad del agua (Rickwood y Carr, 2009). El índice es una expresión numérica utilizada para transformar una gran cantidad de datos de variables en un solo número, que representa el nivel de calidad del agua (Sánchez *et al.*, 2007; Bordalo *et al.*, 2006). El índice de calidad del agua (ICA) también se puede utilizar para agregar datos sobre parámetros de calidad del agua en diferentes momentos y en diferentes lugares y para traducir esta información en un solo valor que defina el período de tiempo y la unidad espacial involucrada (Shultz, 2001). Se han realizado numerosos estudios sobre la evaluación de la calidad del agua, utilizando ICA (Horton, 1965; Khan *et al.*, 2003). El objetivo del presente trabajo es aplicar la herramienta ICA para evaluar los cambios espaciales y del tiempo en la calidad del agua subterránea del acuífero de Maturín, durante el período 2016. Debe mencionarse que este acuífero es una de las principales fuentes de agua para esta ciudad que tiene una población aproximada de 600 000 habitantes.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se llevó a cabo en la ciudad de Maturín, municipio Maturín, estado Monagas, situado geográficamente a 9°46'46" latitud norte y 63°11'05" longitud oeste y a una altura de 63,5 m.s.n.m (Figura 1). Gil *et al.* (2012), señala que el clima de la zona es del tipo Bosque seco tropical, caracterizado por presentar una estación lluviosa de mayo a diciembre y una estación seca de enero hasta abril, con una precipitación media anual de 1219,6 mm, una temperatura media anual de 25,9 °C, una evapotranspiración potencial de 1372 mm y una evaporación de 1573 mm. Tiene una superficie de 13 352 km² y es la sexta urbe más grande del país con 542 259 habitantes (INE, 2011).

Según MPPA (2009), los acuíferos de Maturín se encuentran ubicados en la región hidrológica de la provincia del Orinoco, sistema acuífero Mesa-Las Piedras y se caracterizan por presentar una profundidad media de 40 m, nivel medio de 10 m y caudal de 10,5 L/seg. Constituyen uno de los reservorios subterráneos con mayor potencial del país con unidades litológicas de sedimentos poco o nada



Figura 1. Ubicación geográfica de la Ciudad de Maturín. Estado Monagas. Venezuela.

83200 2008 y el sodio (Na^+) con el microprocesador de sodio marca HANNA modelo HI931101. El fenol se determinó con el espectrofotómetro marca Thermo Scientific modelo Genesys 10 UV Scan y el cloruro (Cl^-) aplicando el método de titulación con nitrato de plata usando una bureta semiautomática. Por último para la determinación de organismos coliformes fecales (CF) se utilizó el método del número más probable (NMP), en diluciones decimales de 10^{-1} y 10^{-2} de la muestra original (COVENIN, 1993).

Determinación del ICA

El ICA se calculó en función de la idoneidad del agua subterránea para consumo humano. Para determinar el ICA se siguieron tres pasos (Tiwari y Mishra, 1985; Singh, 1992). En el primer paso, se le asignó un peso (W_i) a cada uno de los catorce parámetros de calidad del agua (temperatura, pH, dureza, CE, NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Fe^+ , Mn^+ , Na^+ , K^+ , Fenoles y CF) de acuerdo con su relatividad importancia de calidad del agua en general para consumo humano. Los valores asignados estuvieron en el rango de 1 a 4.

Entonces, el peso relativo (RW) se calculó mediante la ecuación (1) de la siguiente manera (Singh, 1992):

$$RW = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Dónde:

RW = el peso relativo.

W_i = el peso asignado de cada parámetro.

n = el número de parámetros.

Los valores de peso relativo calculados (RW) de cada parámetro se dan en la Tabla 1.

En el segundo paso, se calculó una escala de calificación de calidad (Q_i) para todos los parámetros, excepto para el pH; dividiendo su concentración en cada muestra de agua por su estándar respectivo de acuerdo a su valor respectivo, según las directrices de la OMS (OMS, 2006), o los estándares venezolanos para el agua potable enunciados en el Decreto N° 883 (Venezuela, 1995), el resultado se multiplica por 100.

$$Q = \left[\frac{C_i}{S_i} \right] \times 100 \quad (2)$$

Mientras, la calificación de calidad para pH (Q_{pH}) se calculó sobre la base de:

$$Q_{pH} = \left[\frac{C_i - V_i}{S_i - V_i} \right] \times 100 \quad (3)$$

Dónde:

Q_i = la calificación de calidad.

C_i = concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en mg/L.

S_i = valor del parámetro de calidad del agua obtenido de la OMS recomendada o estándar venezolano para el agua potable enunciados en el Decreto 883 del pará-

Tabla 1. Peso relativo de los parámetros de calidad del agua

Parámetros	Unidades	Estándar de Calidad del Agua	Peso Asignado (W_i)	Peso Relativo (RW)
Temperatura	C°	20,00	1	0,0315
pH	pH	8,00	2	0,0631
Dureza	mg/L	500,00	1	0,0315
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	3000,00	2,5	0,0789
NO_3^-	mg/L	50,00	2,2	0,0694
NO_2^-	mg/L	3,00	2	0,0631
SO_4^{2-}	mg/L	400,00	2	0,0631
Cl^-	mg/L	250,00	2	0,0631
Fe^+	mg/L	1,00	3	0,0946
Mn^+	mg/L	0,40	4	0,1262
K^+	mg/L	200,00	1	0,0315
Na^+	mg/L	200,00	1	0,0315
Fenoles	mg/L	0,00	4	0,1262
CF	NMP	100,00	4	0,1262
Total			31,7	1,0000

metro correspondiente, en mg/L.

V_i = el valor ideal que se considera como 7,0 para pH.

Las ecuaciones (2) y (3) aseguran que $Q_i = 0$ cuando un contaminante está totalmente ausente en la muestra de agua y $Q_i = 100$ cuando el valor de este parámetro es justo igual a su valor permisible. Por lo tanto, cuanto mayor es el valor de Q_i , más contaminada está el agua (Sahu y Sikdar, 2008). En el tercer paso, el ICA se calculó de la siguiente manera (Tiwari y Mishra, 1985). El subíndice (SI_i) del i -ésimo parámetro se determinó con la ecuación (4) para cada parámetro químico, luego se usó para calcular el ICA del índice de calidad del agua en general.

$$SI_i = RW \times Qi \quad (4)$$

Finalmente, el ICA se calculó sumando los valores de cada subíndice de cada muestra de agua de la siguiente manera:

$$ICA = \sum_{i=1}^n SI_i \quad (5)$$

Los valores de ICA calculados se clasificaron de acuerdo con Ramakrishnaiah *et al.* (2009) como excelente, bueno, pobre, muy pobre e inadecuado o no apta para consumo humano (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de las aguas de acuerdo al ICA

Valor del ICA	Clase	Calidad del Agua
< 50	I	Excelente
50-100	II	Buena
100-200	III	Pobre
200-300	IV	Muy Pobre
>300	V	No apta para consumo humano

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estadísticas descriptivas relacionadas con la calidad del agua se presentan en el Tabla 3. Los valores de calidad del agua para nitritos, nitratos, Mn^{+} , fenoles y CF sobrepasan los límites permisibles según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) y la normativa nacional Decreto N ° 883 (Venezuela,

1995). Mientras que, para el pH, el valor promedio se encuentra un poco por debajo del valor umbral. Los valores de dureza, CE, Cl^{-} , y Na^{+} parecen ser de desviación estándar muy alta, estas variables cambian considerablemente en los pozos con respecto a sus valores promedios, pero no influyen en la calidad de sus aguas porque no sobrepasan los valores límites establecidos en las normas planteadas.

Parámetros físicos

Los parámetros físicos estudiados se detectaron con valores bajos que no exceden los límites permisibles para contaminantes en descargas de aguas y bienes nacionales del Decreto N° 883 (Venezuela, 1995). La temperatura es un parámetro muy importante para un acuífero, en este aspecto, Gil (2003), señala que, por lo general, las temperaturas de las aguas subterráneas permanecen constantes a menos que existan factores externos que intervengan en ellas. La variación en la temperatura del agua afecta la solubilidad de sales, contenido de oxígeno disuelto (OD), tasa de biodegradación orgánica de los materiales y otros parámetros físico-químicos (Rao y Rao, 2010). Los valores de temperatura en el presente estudio variaron de 28,20 °C (P4) a 31,20 °C (P3).

Los valores de pH presentaron un valor mínimo de 4,12 (P6) y uno máximo de 7,56 (P1), con un promedio de 5,57 que les da a las aguas subterráneas de la ciudad de Maturín una naturaleza ligeramente ácida. Los valores de pH por debajo de 6, observados en los pozos 3,4,5,6,7 y 8 se deben posiblemente a las condiciones geológicas de la zona; que indica que los carbonatos disueltos están predominantemente en forma de HCO_3 (Adams *et al.*, 2001) y señalando la naturaleza alcalina de las muestras. A pH bajo, una parte importante del carbono inorgánico disuelto está como ácido carbónico (H_2CO_3) ó CO_3 disuelto. Además, las aguas subterráneas suelen contener cantidades apreciables de ácido silícico no disociado, que se suele expresar como sílice disuelta. En general, un agua con un pH menor a 6,5 podría ser ácida y corrosiva. Por lo tanto, el agua podría disolver iones metálicos tales como: hierro, manganeso, cobre, plomo y zinc, accesorios de

Tabla 3. Estadísticos descriptivos básicos de los parámetros físicos, químicos y biológicos estudiados en 8 pozos del Municipio Maturín. Periodo marzo-mayo, 2016

Parámetro	Unidad	Rango (N° de pozos)		Media	LMP*		Desviación Estándar
		Mínimo	Máximo		Decreto 883	OMS	
Temperatura	°C	28,20(P4)	31,20(P3)	29,51			0,66
pH	1:1	4,12(P6)	7,56(P1)	5,57	6,0-8,5		1,01
Dureza	mg/L	15,15(P4)	217,17(P1)	27,73	500,0		63,08
CE	μS/cm	30,00(P4)	600,00(P1)	152,19		3000	177,20
Fe ⁺	mg/L	0,00(P6)	0,54(P1)	0,09	0,1	0,3	0,14
Mn ⁺	mg/L	0,00(P1,P2,P3, P4,P5,P6,P7)	0,50(P8)	0,09	0,1	0,5	0,15
Na ⁺	mg/L	2,53(P4)	90,62(P8)	30,35	200		22,38
K ⁺	mg/L	5,00(P2)	40,00(P1,P4, ,P7)	25,00		50	8,34
NO ₂ ⁻	mg/L	0,00(P1,P2,P3, P4,P5,P6,P7)	22,00(P8)	4,04	5	3	6,07
NO ₃ ⁻	mg/L	4,50(P3)	59,50(P2)	25,13	5	50	12,80
SO ₄ ²⁻	mg/L	0,00(P2,P3,P4, P5,P6,P7, P8)	45,00(P1)	5,42	400	250	12,24
Cl ⁻	mg/L	30,00 (P2)	150,00(P6)	67,92	600	250	27,97
Fenoles	mg/L	0,0026(P2)	0,0224(P3)	0,0075	0,002		0,063
CF	NMP/10 0mL	0(P2,P3,P4,P5, P6,P7, P8)	4300(P1)	260,75	0		913,1636

*LMP=Límite máximo

plomera y tuberías. Un agua con un pH bajo y corrosivo podría causar un daño prematuro en las tuberías de metal, y asociado a problemas estéticos tales como un sabor metálico o amargo, manchas en la ropa, y la característica de coloración “azul-verde” en tuberías y desagües. La forma primaria para tratar el problema del agua bajo pH es con el uso de un neutralizador. ESF (2006) señala que los valores de pH en aguas subterráneas son afectados por la geología de las rocas del subsuelo, la fisiografía de la región y por contaminantes industriales y agrícolas, además indica que las aguas con pH menor a 6 se pueden caracterizar por ser blandas, corrosivas y no contener iones metálicos.

La conductividad eléctrica en el agua se debe a la ionización de sólidos inorgánicos disueltos y se convierten en una medida de los sólidos totales disueltos (STD). Es el índice básico para verificar la idoneidad del agua para fines agrícolas (Rizvi *et al.*, 2016). En este estudio existen diferencias significativas en la CE para los pozos estudiados, pero no para los meses, siendo el valor más bajo de CE 30,00 μS/cm en el P4 y el más alto de 600,00 μS/cm para el P1. Los niveles de CE más altos se encuentran en los pozos de la zona Norte que presentan un acumulado de sales inorgánicas o iones, por múltiples actividades antropogénicas rela-

cionadas sobre todo con el ámbito agrícola y doméstico, que aumentan los niveles de este parámetro, aunque la presencia de iones en las aguas subterráneas esta atribuido mayormente a la condición geológica, estas también colaboran con la cantidad y tipos de iones presentes en el agua. El resto de los pozos presentaron niveles de CE por debajo de 200 μS/cm, que se considera aceptable para el agua potable.

La dureza está relacionada con la concentración de calcio y magnesio en el agua, se clasifican de acuerdo al grado de dureza que posea. Los valores más bajo para este parámetro lo encontramos en el P4 con 15,15 mg/L y un máximo de 217,17 mg/L para el P1, para este parámetro existen diferencias significativas para los pozos estudiados, mas no para los meses, dándole así una clasificación de agua muy dura (>200 mg/L) al P1; moderadamente dura (entre 100 y 200 mg/L) al P2 y blandas (<50 mg/L) a los pozos P3, P4, P5, P6, P7 y P8. Las aguas blandas tienen una capacidad de amortiguación baja y pueden ser más corrosivas para las tuberías. Facsa (2014), señala que la presencia de sales de magnesio y calcio en el agua depende fundamentalmente de las formaciones geológicas atravesadas por el agua de forma previa a su captación. Ya que las aguas subterráneas que atraviesan acuíferos carbona-

tados (calizas) son los que presentan mayor dureza por la presencia de carbonato de calcio y magnesio. No obstante, las aguas subterráneas procedentes de acuíferos con composición silicatada (granitos) dan lugar a un agua blanda, es decir con cantidades muy bajas de calcio y magnesio.

Parámetros químicos

De los cationes estudiados (Fe^+ , Mn^+ , K^+ , Na^+), el Mn^+ en algunas estaciones de muestreo presento valores por encima de los estándares actuales de la norma venezolana. La presencia de Mn^+ puede derivarse de la generación de procesos de reducción (bajo potencial redox) en las corrientes contaminadas con aguas residuales, estos procesos solubilizan metales como el Mn^+ (Chávez-Alcántar *et al.*, 2011). Las aguas residuales son también fuente de metales pesados (Chávez-Alcántar *et al.*, 2011). A pesar de la ausencia del elemento en algunos pozos, se evidencio su presencia en otros en concentraciones que sobrepasan la normativa sanitaria (0,1 mg/L). Los pozos P2, P4, P5 y P6, no evidenciaron la presencia de este elemento. Por lo que, el promedio general de manganeso, estuvo en $0,09 \pm 0,15$ mg/L, con un valor máximo de 0,50 mg/L para el P8 y un mínimo de 0,00 mg/L. En el caso de los aniones, nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) y para los compuestos orgánicos (fenoles), presentaron valores por encima de la norma. El NO_2^- puede estar presente en las aguas como consecuencia de la oxidación del amonio o como resultado de la reducción microbiana de los nitratos. Dada su inestabilidad, puede ser una evidencia de una contaminación reciente. La presencia de este compuesto en el agua está relacionada con el uso de componentes nitrogenados de uso agrícola, y otras sustancias químicas a base de nitrógeno. Los nitritos perturban procesos fisiológicos vitales como la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que conlleva a cianosis y en algunas ocasiones hasta la muerte (Pacheco y Cabrera, 2003). El agua subterránea con mayor concentración de NO_2^- la presento el pozo de la Comunidad de San Vicente (P8) con 22,00 mg/L, indicando que las actividades agrícolas, con el uso de ureas y otros fertilizantes nitrogenados aplica-

dos al suelo están contaminando el acuífero, llevándolo hasta un nivel no apto para consumo humano, los demás pozos se encuentran por debajo de 5 mg/L. La toxicidad del ion nitrito determina la impotabilidad de la misma (Albert, 2009). Para el NO_3^- se observó su presencia en todos los puntos de muestreo, resultando con mayor concentración en el P2 con valores de 59,50 mg/L y un valor mínimo para el P3 con 4,50 mg/L. A pesar de que las aguas subterráneas presentaron nitrato, solo en P2 se observaron valores por encima de la normativa (OMS, 2006). El NO_3^- presente en las aguas subterráneas tiene un origen orgánico. Los altos valores de esta especie se asocian con la actividad antrópica, excreta de animales, uso de fertilizantes (Cardona *et al.*, 2004; Jin *et al.*, 2004). La concentración de esta especie en aguas subterráneas no contaminadas varía ampliamente, aunque no suele sobrepasar los 10 mg/L (Porras *et al.*, 1985). Para los fenoles se observaron diferencias significativas en los meses de muestreo y en los pozos estudiados, dando como resultados valores mayores de 0,002 mg/L en todos los muestreos, valor umbral indicado por el Decreto N° 883 (Venezuela, 1995). El pozo con mayor concentración de fenol fue el pozo P3 ubicado en una de las zonas urbanas, con un valor de 0,0224 mg/L, seguido del pozo P1 con 0,0206 mg/L y el pozo P7 con 0,0159 mg/L, estos dos últimos también ubicados en zonas urbanas. Los demás acuíferos también presentaron este compuesto químico, aunque en menor proporción. Las concentraciones presentes de este compuesto en las aguas subterráneas de la ciudad de Maturín son alarmantes, ya que todos las aguas estudiadas durante el periodo de lluvia incrementaron los valores de este compuesto químico sobrepasando los niveles permitidos por Decreto N° 883 de 0,002 mg/L (Venezuela, 1995), siendo sumamente inquietante ya que estudios científicos señalan que un exceso de este compuesto en el agua para consumo puede generar toxicidad, debido a su acción cancerígena y mutagénica en los seres vivos (Nieves *et al.*, 2005), además de alteraciones en el intestino y muchos casos la muerte de acuerdo a la concentración de ingesta. La presencia de este compuesto en las

aguas subterráneas de Maturín es una característica que se debe analizar con más detalles debido que la incorporación de este a los acuíferos puede ser asociado a procesos de contaminación de la fuente por desechos industriales, aguas servidas o residuales y/o agentes químicos que presente este compuesto fenólico (Díaz *et al.*, 2005). Por otro lado, Edmunds (2004), indica que la calidad química del agua subterránea refleja los aportes desde la atmósfera, el suelo y las reacciones agua-roca (meteorización), así como fuentes artificiales de contaminación que se infiltran hacia los acuíferos.

Parámetros microbiológicos

Por último, para los CF la legislación venezolana emitida en el Decreto N° 883 (Venezuela, 1995), indica que el valor permisible de coliformes fecales para aguas de consumo humano debe ser 0 NMP/100mL de agua y para el caso de uso agropecuario debe estar por debajo de 100 NMP/100mL de agua. En esta investigación, se observó un valor promedio general de coliformes fecales de $260,75 \pm 913,16$, con un valor máximo de 4300 y un valor mínimo de 0 NMP/100ml. Valor que sobrepasa en más de un 4000 % al máximo valor permisible por la normativa vigente. Tomando en consideración todos los pozos se observa que los que estuvieron por debajo del valor crítico durante todos los muestreos fueron los pozos P7 y P8, que no presentaron estos microorganismos, siendo los únicos aptos bacteriológicamente para ser consumidos por los seres humanos. El pozo más crítico con un valor promedio de 1076 NMP/100ml de coliformes fecales fue el pozo P1. Estos altos valores de CF tienen como causa principal la filtración de aguas contaminadas hacia los acuíferos debido posiblemente a una mala disposición y manejo de los desechos fecales (pozos sépticos, napas freáticas y otros) y las actividades pecuarias de esta zona.

Actualmente en Venezuela, el problema de la contaminación microbiológica se presenta de manera generalizada, a causa de los vertimientos de aguas residuales en los ambientes marinos y costeros, así como también en otros ecosistemas acuáticos, tanto superficiales

como subterráneas. Esta problemática se ve magnificada si se tiene en cuenta la falta de tratamiento de los desechos líquidos y sólidos a lo largo de la geografía nacional. De la calidad de las aguas depende en gran medida la supervivencia de las especies y de los ecosistemas, que a su vez reflejan la conservación o el deterioro en que se encuentran por causa de actividades o fenómenos tanto naturales como de tipo antrópicos, por lo tanto, es importante cumplir con las directrices y normativas que existen para garantizar una buena calidad del agua y por ende del ecosistema, y de los usos que de este se deriven (Gil *et al.*, 2013).

Índice de Calidad de Agua

Los valores de ICA calculados para 8 pozos subterráneos en la ciudad de Maturín variaron de 15,42 hasta 604,99 como se muestra en la Figura 3. El valor promedio observado fue 73,93 lo que califica de forma general a las aguas en un nivel II como aguas de buena calidad.

Por lo tanto, el 45,83% del agua de los pozos se ubicó en la clase I agua excelente, el 16,67% en clase II - agua buena, el 29,17% en clase III pobre, el 4,17% en clase IV muy pobre y solo el 4,17% en clase V no apta para consumo humano. Si se toma el valor de ICA de 100, como límite superior o umbral para agua potable, podemos decir que el 62,50% de las aguas (suma de las clases I y II), son aptas para consumo humano. Más del 8% de las muestras de agua de los pozos tomadas presentaron valores de ICA más de dos veces por encima del umbral de potabilidad señalado (Tabla 4).

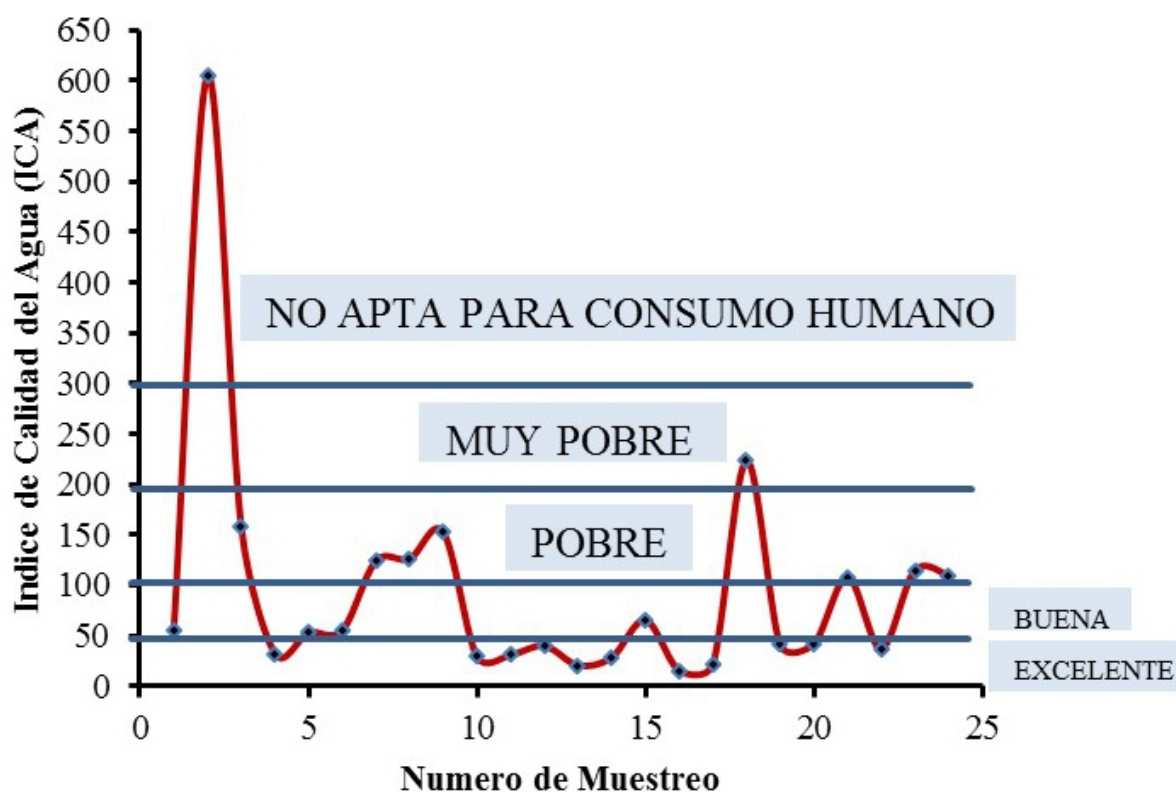


Figura 3. Variación de los valores del ICA en las muestras de agua estudiadas en los pozos subterráneos de la ciudad de Maturín durante el periodo marzo-mayo 2016.

Tabla 4. Clasificación de la calidad del agua de acuerdo al valor del índice de calidad del agua y porcentaje de muestras de agua que caen bajo las diferentes categorías de calidad.

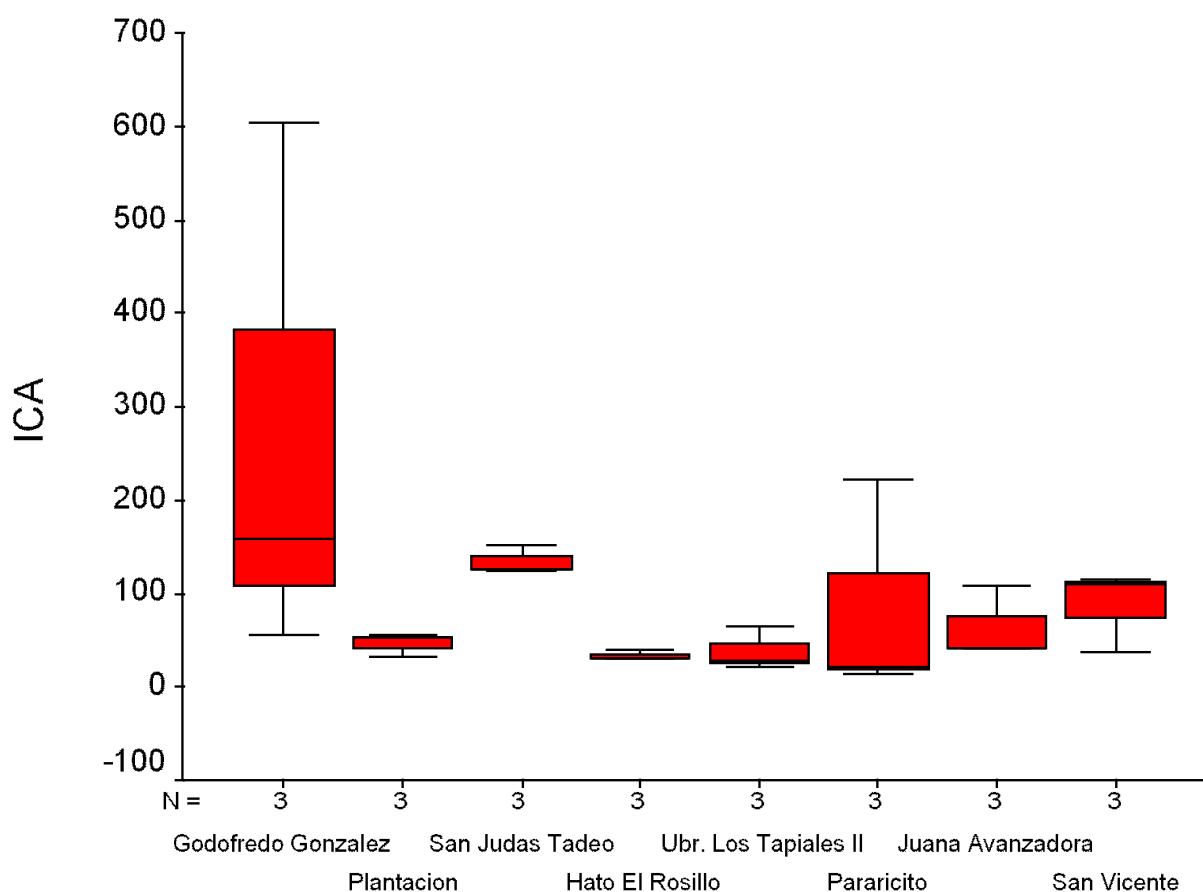
Valor de ICA	Clase	Calidad del Agua	% De la muestra estudiada
<50	I	Excelente	45,83%
50-100	II	Buena	16,57%
100-200	III	Pobre	29,17%
200-300	IV	Muy pobre	4,17%
>300	V	No apta para consumo humano	4,17%

La excelente calidad de las aguas tipo I, pertenece a la zona del Sector Guanaguaney, Urb Lomas de Tapiales II y a la Comunidad de Plantación. En cambio, las aguas tipo II, se ubicaron en la zona del Conjunto Residencial Juana la Avanzadora, ETAR Simón Bolívar y la Comunidad de San Vicente. Para las aguas tipo III de clasificación pobre, las encontramos en la Urb. Lomas del Viento, debido a la incorporación de fenoles al agua subterránea que procede de los desechos inorgánicos con derivados fenólicos y a pesar de que la zona no tiene una actividad industrial a gran escala, tiene antecedentes de ser vertedero de desechos de la reciente actividad urbanística de la zona, los cuales fueron compactado para el establecimiento de las

nuevas obras de construcción y por degradación de los mismos, penetrado hasta llegar al acuífero concentrándose en el mismo y cambiando la condición ideal del agua natural. Las aguas de clase IV, se observaron en el punto de muestreo de la Urbanización Godofredo González siendo estas aguas muy pobres, estos valores indican un deterioro considerable de las aguas de este acuífero, que se deben principalmente a la planta de tratamiento de aguas servidas de la comunidad, la cual se desborda por toda el área adyacente debido a su inoperatividad y junto con las precipitaciones logran infiltrar sustancias que alteran no solo los niveles de CE, Fe, Mn, NO_3^- y NO_2^- sino también los niveles de compuestos fenólicos y de CF, llegando a valores que

sobrepasan los establecidos por el Decreto N° 883 (Venezuela, 1995). El análisis de varianza para la comparación de valores ICA según el mes y la estación, mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) para los meses y los pozos. Tomando en consideración las estaciones y considerando como valor crítico el valor

de 100, por encima se considera un agua de calidad pobre, se observa que la mayoría de los pozos están por debajo de este valor, a excepción de los pozos P1 (Urb. Godofredo Gonzales) y P3 (San Judas Tadeo), que presentaron en la mayoría de las observaciones valores por encima de 100 (Figura 4).



Pozos

Figura 4. Caja de ploteo para la variable ICA, observada en los pozos. Período marzo-mayo 2016. Variación espacial.

En la Figura 5, se observa que el mes más crítico con valores por encima de 100, es el mes de mayo, que coincide con el comienzo del período lluvioso, que favorece la proliferación de microorganismos. Con las lluvias hay incremento del caudal y escorrentía superficial que facilita o mejora el proceso de infiltración y percolación de agua en el suelo. Durante este período también aumentaron los niveles de pH, Mn^{+} , fenoles y CF, los cuales estaban en bajas concentraciones en el período de verano. Caso contrario ocurrió con los parámetros CE, dureza, Fe^{+} , Na^{+} y NO_3^{-} , que disolvieron sus concentraciones. El

mes con máxima calidad de sus aguas, con valores promedios de 44,68 (< 50), lo tenemos en marzo, que califica las aguas de este mes como de excelente calidad.

Durante esta investigación se corroboró, que algunas zonas presentaron variaciones en la característica de calidad de agua para consumo humano, sobrepasando los límites permitidos por la normativa sanitaria del país. De allí la importancia de corregir de forma individual la potabilización y purificación del agua que se consume, de acuerdo a la disponibilidad de los recursos económicos y productos necesarios para ejecutar

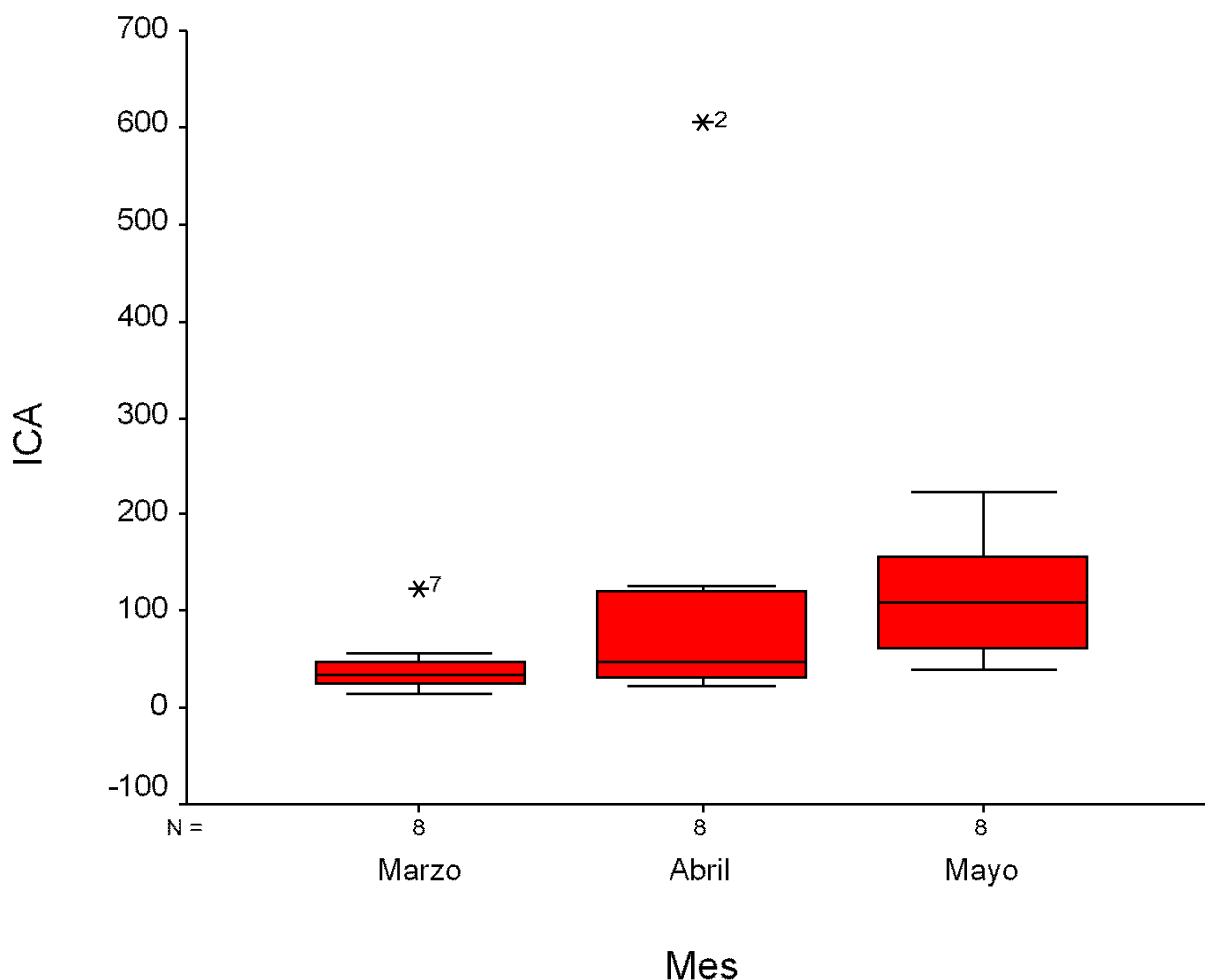


Figura 5. Caja de ploteo para la variable ICA, según los meses de muestreo, marzo-mayo 2016, en los pozos subterráneos de la ciudad de Maturín. Variación temporal.

el debido tratamiento. Vizcaíno (2017), señala que el mayor factor de contaminación de las aguas subterráneas en la ciudad de Maturín, que afecta a los pozos de manera directa e indirecta, está relacionado con la actividad doméstica, sobre todo con los vertidos de las aguas residuales a causa de una mala disposición final y falta de mantenimiento de los sistemas de tratamiento existentes en estas zonas. Además de los usos domésticos existen otras actividades que afectan las características físicas, químicas y biológicas del agua, que impiden su consumo directo, por lo que se requieren de una serie de correcciones y tratamientos para eliminar esas partículas o sustancias perjudiciales a la salud. Por otro lado, tenemos la falta de conciencia en los usuarios y los organismos que regulan la explotación y uso del recurso agua y también la regulación del uso de las tierras en zonas adyacentes a los pozos, a

pesar de que existe una norma que regula estas operaciones (Venezuela, 1997), el mismo debe ser difundido a nivel de usuarios del agua con mayor nivel de responsabilidad para proteger los acuíferos de las zonas y complementar los requerimientos concretos de acuerdo a la afectación de cada pozo.

En la ciudad de Maturín, el principal uso de las aguas es para consumo humano y uso doméstico pero es evidente que también existen otras actividades que afectan sus características físicas, químicas y biológicas, como la agricultura, ganadería, industria, la recreación y establecimiento de nuevos urbanismos entre otros, actividades que en su paso dejan efectos secundarios en el ambiente, especialmente donde se encuentran los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos comprometiendo su integridad natural. Todo esto trae como consecuencia que estas

aguas no puedan ser consumidas de forma directa por lo que se requieren de una serie de correcciones y tratamientos para eliminar esas partículas o sustancias perjudiciales a la salud (Vizcaíno, 2017; Gil *et al.*, 2018).

Existen algunas medidas de tratamiento doméstico del agua para un almacenamiento y consumo seguro, las cuales según sea la condición del agua a tratar no requieren de un alto costo y se pueden aplicar fácilmente. Estas medidas son: depuración, sedimentación, filtración, desinfección, tratamiento físico basado en la aplicación de calor por medio de la desinfección por ebullición y tratamiento con radiación.

Finalmente, se concluye que las muestras de agua subterráneas con la mayor cantidad de parámetros en concentraciones por encima del umbral permisible por las normas nacionales e internacionales fueron los extraídos de los pozos: P1 en la Urbanización Godofredo González (pH, Fe^+ , Mn^+ , NO_3^- , fenoles y CF); seguido por el P3 de la Urbanización San Judas Tadeo (pH, Fe^+ , Mn^+ , y fenoles), a continuación la Comunidad de San Vicente (Mn^+ y NO_2^-); la Urb. Lomas del Viento (temperatura y fenol); el ETAR Simón Bolívar (Na^+); y el pozo de la Comunidad Plantación (NO_2^-). Los resultados de esta investigación indican que es necesario aplicar medidas correctivas para mitigar el efecto de estos contaminantes en las zonas estudiadas, también es necesario que los organismos gubernamentales se encarguen de mantener de manera intensiva estudios en cuanto a la calidad de agua y que se continúen realizando de forma periódica estos análisis para evitar una epidemia a causa de una contaminación de las aguas. Un estudio regular del ICA puede servir de guía a las autoridades locales en la toma de decisiones adecuadas para implementar las medidas correctivas. El estudio indica que el ICA es una de las mejores herramientas para calcular el potencial de contaminación de manera comprensiva y que también se puede utilizar para clasificar la calidad del agua de una forma fácil de entender para todo criterio científico de calidad del agua (Gil *et al.*, 2018).

IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams S., R. Titus, K. Pietersen., G. Tredoux, y C. Harris. 2001. "Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa". *Journal of Hydrology* 241: 91-103.
- Albert L. 2009. *Nitratos y nitritos*. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-03a17.pdf>. (Consultado 26 de diciembre de 2016)
- APHA (American Public Health Association). 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington D.C. (USA): American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), and Water Environment Federation (WEF).
- Bordalo A. A., R. Teixeira, y W. J. Wiebe., 2006. "A Water Quality Index Applied to an International Shared River Basin: The Case of Douro River," *Environmental Management* 38 (6): 910-920.
- Boyacioglu H. 2006. "Surface Water Quality Assessment Using Factor Analysis." *Water SA* 32 (3): 389-394.
- Boyacioglu H., y H. Boyacioglu. 2007. "Surface Water Quality Assessment by Environmetric Methods." *Environmental Monitoring and Assessment* 131 (1-3): 371-376.
- Cardona A., J. Carrillo, R. Huizar, E. Graniel. 2004. "Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, México." *Environmental Geology* 45: 350-366.
- Chávez-Alcántar A., M. Velázquez-Machuca, J. L. Pimentel-Equihua, J. Venegas-González, J. L. Montañez-Soto, y G. Vázquez-Gálvez. 2011. "Hidroquímica de las aguas superficiales de la Ciénega de Chapala e índice de calidad de agua". *Terra Latinoamericana* 29 (1): 83-94.
- COVENIN (Comisión Venezolana de Normas Industriales). 1993. "Método de determinación del Número Más Probable de bacterias coliformes." Caracas (Venezuela).

- Díaz A., N. Rincón, J. Marín, E. Behling, E. Chacin, y N. Fernandez. 2005. "Degradación de fenoles totales durante el tratamiento biológico de aguas de producción petroleras". *CIENCIA* 13 (3): 281-291.
- Duran L. 2011. "Las políticas hídricas en Venezuela en la gestión del agua subterránea." *Revista Voces: Tecnología y pensamiento* 5 (1-2).
- Dwivedi S. L., y V. Pathak. 2007. "A Preliminary Assignment of Water Quality Index to Mandakini River, Chitrakoot." *Indian Journal of Environmental Protection* 27 (11): 1036-1038.
- ESF (Ecosystem Sciences Foundation). 2006. *Calidad del agua de los pozos en San Miguel de Allende Fase I: Resultados y conclusiones*. San Miguel de Allende (México): Dirección de Medio Ambiente y Ecología, la Dirección de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial y el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de San Miguel de Allende (SAPASMA).
- Edmunds W. 2004. *Calidad del agua subterránea 2004*. www.lgt.lt/geoin/files/07_calidad_del_agua_subterranee.doc. (Consultado 26 de diciembre de 2016).
- Facsa. 2014. *La calidad de la dureza del agua 2014*. <http://www.facsa.com/el-agua/calidad/la-dureza-del-agua#.WEXhmdLhDMx>. (Consultado 16 de diciembre de 2016)
- Gil, J. 2003. *Recursos Hidrogeológicos 2003* <http://www.gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wpcontet/uploads/2011/07/recurso.pdf>. (Consultado 11 de mayo de 2015)
- Gil J. A., B. I. Lozada, N. López, L. Márquez, y M. D. V. Salazar. 2012. "Evidencias de la variabilidad y cambios climáticos en Maturín, estado Monagas, Venezuela". *Revista Científica UDO Agrícola* 12 (2): 389-399.
- Gil J. A., G. Belloso, I. J. Maza, C. M. C. Sánchez, C. E. Bolívar, y P. D. Martínez. 2013. "Evaluación de la calidad microbiológica y niveles de nitratos y nitritos en las aguas del río Guarapiche, estado Monagas, Venezuela." *Revista Científica UDO Agrícola* 13 (1): 154-163.
- Gil J. A., C. Vizcaino, y N. J. Montaña. 2018. "Evaluación de la calidad del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA). Caso de estudio: Cuenca del Río Guarapiche, Monagas, Venezuela." *Anales Científicos* 79 (1): 111 – 119.
- Horton R. K. 1965. "An Index Number System for Rating Water Quality," *Journal of Water Pollution Control Federation* 37 (3): 300-306.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2011. *Censo nacional de población y vivienda resultados por entidad federal y municipio del estado Monagas*. Caracas (Venezuela): INE.
- Khan F., T. Husain, y A. Lumb. 2003. "Water Quality Evaluation and Trend Analysis in Selected Watersheds of the Atlantic Region of Canada," *Environmental Monitoring and Assessment* 88 (1-3): 221-248.
- MPPA (Ministerio del Poder Popular Para el Ambiente). 2009. *Plan Nacional de Gestión Integral de Las Aguas*. Caracas (Venezuela): Ministerio Popular para el Ambiente.
- Nasirian M. 2007. "A New Water Quality Index for Environmental Contamination Contributed by Mineral Processing: A Case Study of Amang (Tin Tailing) Processing Activity." *Journal of applied sciences* 7 (20): 2977-2987.
- Nieves K., A. Riera, C. Vega, y L. Manganiello. 2005. "Desarrollo de sistemas de manipulación de muestras para la determinación de fenol y pentaclorofenol en agua potable." *Revista Ingeniería UC* 22 (2): 88-105
- OMS (Organización Mundial de la Salud) 2006. *Guías para la calidad del agua potable: Primer apéndice a la tercera edición*. Génova (Suiza): OMS
- Pacheco J. y A. Cabrera. 2003. "Fuentes principales de nitrógeno y nitratos en aguas subterráneas." *Revista científica Ingeniería* 7 (2): 47-54
- Porras M. J., P. Nieto, C. Alvarez, A. Fernández, y V. Gimeno. 1985. *Calidad y Contaminación de las*

- aguas subterráneas en España*. Madrid (España): IGME
- Ramakrishnaiah C., C. Sadashivaiah, y G. Ranganna, 2009. "Assessment of Water Quality Index for the Ground Water in Tumkur Taluk," *E-Journal of Chemistry* 6 (2): 523-530.
- Rao, G. S. y G. N. Rao, 2010, "Study of groundwater quality in greater Visakhapatnam city, Andhra Pradesh (India)." *J. Environ. Sci. Eng* 52 (2): 137-146.
- Rickwood C. J y G. Carr. 2009. "Development and Sensitivity Analysis of a Global Drinking Water Quality Index," *Environmental Monitoring and Assessment* 156 (1-4): 73-90.
- Rizvi, N., K. Deeksha, y J. Varun. 2016. "World Academy of Science, Engineering and Technology International." *Journal of Environmental, Chemical Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 10 (1): 10.
- Sahu P., y P. K. Sikdar. 2008. "Hydrochemical Framework of the Aquifer in and around East Kolkata Wetlands." *Environ Geol* 55: 823-835. DOI: 10.1007/s00254-007-1034-x
- Sánchez E., M. F. Colmenarejo, J. Vicente, A. Rubio, M. G. García, L. Travieso, y R. Borja. 2007. "Use of the Water Quality Index and Dissolved Oxygen Deficit as Simple Indicators of Watershed Pollution." *Ecological Indicators* 7 (2): 315-328.
- Sargaonkar A., y V. Deshpande. 2003. "Development of an Overall Index of Pollution for Surface Water Based on a General Classification Scheme in Indian Context," *Environmental Monitoring and Assessment* 89 (1): 43-67.
- Shultz M. T. 2001. "A Critique of EPA's Index of Watershed Indicators," *Journal of Environmental Management* 62 (4): 429-442.
- Simeonov V., J. W. Einax, I. Stanimirova y J. Kraft. 2002. "Environmetric Modeling and Interpretation of River Water Monitoring Data." *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 374 (5): 898-905.
- Simoes F. S., A. B. Moreira, M. C. Bisinoti, S. M. N. Gimenez, y M. J. S. Yabe. 2008. "Water Quality Index as a Simple Indicator of Aquaculture Effects on Aquatic Bodies," *Ecological Indicators* 8 (5): 476-484.
- Singh, D. F. 1992. "Studies on the water quality index of some major rivers of Pune, Maharashtra." *Proceedings of the Academy of Environmental Biology* 1 (1): 61-66.
- Tiwari, T. N., y M. A. Mishra. 1985. "A preliminary assignment of water quality index of major Indian rivers." *Indian J Environ Protect* 5: 276-279.
- Vaux H. J. 2001. "Water Quality (Book Review)" *Environment* 43 (3): 39.
- Venezuela. 1995. "Decreto N° 883. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos." Caracas (Venezuela).
- Venezuela. 1997. "Decreto N° 2048. Normas para la ubicación, construcción, protección, operación y mantenimiento de pozos perforados destinados al abastecimiento de agua potable." Caracas (Venezuela).
- Vizcaíno, C. 2017. *Estudios físicos, químicos, biológicos e hidráulicos de las aguas subterráneas en Maturín, Estado Monagas. Venezuela. Marzo - Mayo 2016*. Tesis de Maestría. Universidad de Margarita. Nueva Esparta (Venezuela).
- Zanfang J., y F. W. Chen, F. N. Ogura. 2004. "Detection of nitrate sources in urban groundwater by isotopic and chemical indicators, Hangzhou City, China." *Environmental Geology* 45: 1017-1024.