

Índices de calidad del agua en la microcuenca de la quebrada Victoria, Guanacaste, Costa Rica (2007-2008)

Bi Yun Zhen-Wu

Laboratorio de Geoquímica, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Guanacaste, Costa Rica; biyun29@gmail.com

Recibido 4-XII-2009 Corregido 6-I-2010 Aceptado 9-II-2010

ABSTRACT

Indices of water quality in the watershed of Victoria creek, Guanacaste, Costa Rica (2007-2008). Costa Rican Guidelines for the Evaluation and Classification of the Surface Waters (IHCA-CR) and the National Sanitation Foundation of the USA (U.S.NSF) water quality indexes, were evaluated during the hydrology year 2007-2008 in Victoria Creek, Costa Rica. A total of 15 sampling sites composed the monitoring network. The water had an incipient contamination (range 4-6 points, IHCA-CR index) and good quality (range 71-90 points, U.S.NSF index) and was moderately hard (range 68-82mgL⁻¹ CaCO₃) in 87% of sampling sites and soft (range 33-52mgL⁻¹ CaCO₃) in 13% of sampling sites. The dominant type of water in the 2008 dry season was calcium-magnesium sulfate (47% of sampling sites), followed by the calcium sulfate (27% of sampling sites); the remaining sites (26%) had a mixture of hydrogencarbonate and sulfate water. Future monitoring of the water quality and geothermal development effects in the basin should incorporate the following indicators: fecal coliform as bacterial contamination; turbidity as physical quality; dissolved oxygen percentage as aquatic system state; conductivity as dissolved ions content; water temperature as thermal contamination; and chloride as geothermal water tracer.

KEY WORDS

Physicochemical water quality, bacteriological water quality, water quality index, geothermal development effect, Victoria River.

RESUMEN

Se evaluó, durante el año hidrológico 2007-2008, la calidad del agua de la quebrada Victoria, Costa Rica, mediante la aplicación de los índices de calidad del agua del Reglamento costarricense para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales (IHCA-CR) y el de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos (ICA-U.S.NSF), para establecer una línea base para los programas de seguimiento de su calidad y de los efectos del desarrollo geotérmico. La red de muestreo comprendió 15 sitios. Se encontró en el agua de la quebrada una contaminación incipiente (entre 4 y 6 puntos), según el IHCA-CR, y una calidad buena (entre 71 y 90 puntos), según el ICA-U.S.NSF. El agua según su dureza total como carbonato de calcio se clasificó en moderadamente dura (entre 68mgL⁻¹ y 82mgL⁻¹ de CaCO₃) en 87% de los sitios y blanda (entre 33mgL⁻¹ y 52mgL⁻¹ de CaCO₃) en 13% de los sitios. El tipo de agua según la caracterización geoquímica que predominó en la época seca del 2008, fue la sulfatada cálcica-magnésica (47% de los sitios), seguida de la sulfatada cálcica (27% de los sitios) y los sitios remanentes (26%) en mezclas de aguas hidrogenocarbonatas y sulfatadas. Para los programas de seguimiento de la calidad del agua de la quebrada y de efectos del desarrollo geotérmico en la microcuenca, debe incluir los siguientes indicadores: de contaminación fecal, los coliformes fecales; de calidad física, la turbiedad; del estado de los sistemas acuáticos, el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto; del contenido de sales disueltas, la conductividad; de contaminación térmica, la temperatura del agua; de trazador de aguas geotérmicas, el cloruro.

PALABRAS CLAVE

Calidad físico-química del agua, calidad bacteriológica del agua, índice de calidad del agua, efectos desarrollo geotérmico, quebrada Victoria.

Las aguas superficiales, como las de las nacientes y los ríos, y subterráneas son vulnerables a diversas fuentes de contaminación por sustancias químicas o microorganismos patógenos, ya sea de origen natural o por intervención humana (WWPA 2003). La calidad natural del agua

está determinada por las condiciones geomorfológicas del suelo y es relevante para evaluar si una variación en la concentración de los parámetros medidos se debe a cambios naturales o a efectos de las actividades humanas, incluyendo el desarrollo geotérmico (Bianchini et al. 2005).

De ahí la importancia del establecimiento de una línea base para analizar las tendencias a lo largo del tiempo.

La evaluación de la calidad del agua es el proceso de valoración de la naturaleza física, química y biológica del agua en relación con la calidad natural, los efectos humanos y los usos deseados, principalmente, los que puedan afectar la salud humana y la de los sistemas acuáticos (Chapman 1996). Se define en función de un conjunto de parámetros físico-químicos y/o microbiológicos, así como de sus valores de aceptación o de rechazo, y son útiles para evaluar puntualmente los contaminantes específicos presentes en el agua (Arcos et al. 2005). Los índices son herramientas rápidas para conocer en forma general el estado de un cuerpo de agua y observar su tendencia evolutiva (Sancha & Espinoza 2001).

Los trabajos de mayor importancia a nivel mundial se deben al índice desarrollado por la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos (U.S.NSF, por sus siglas en inglés), por ser el más utilizado y modificado en muchos países del mundo, tales como España, Brasil y Colombia, entre otros (Samboni et al. 2007). En Costa Rica se aprobó en 2007 el Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales, que incorpora el uso de índice para evaluar su calidad físico-química (Costa Rica 2007).

En la actualidad los índices desarrollados involucran desde un parámetro hasta más de 30 y no existe uno universal debido a las condiciones y los problemas ambientales específicos de cada área (Samboni et al. 2007). Por esto, la aplicación y el seguimiento continuo de cada parámetro permiten adecuar el índice a nivel regional y local.

La microcuenca de la quebrada Victoria (Fig. 1) abarca un área de 4,14km² y se localiza en la parte noroeste de Costa Rica. Sus aguas drenan a la subcuenca del río Colorado, el cual desagua en la cuenca del río Tempisque y desemboca en el océano Pacífico.

La quebrada Victoria se ubica en el sector suroeste del complejo volcánico Rincón de la Vieja-Santa María. Al noroeste se encuentra la zona con las manifestaciones geotérmicas superficiales más grande del país, Las Pailas, cuyo campo geotérmico está siendo desarrollado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE 2005). Estos fluidos se caracterizan por alta temperatura (de 20°C a 96°C) y salinidad (de 50mgL⁻¹ a 60mgL⁻¹ de boro, de 2mgL⁻¹ a 3mgL⁻¹ de fluoruro y de 6000 a 7000mgL⁻¹ de cloruro) (Tassi et al. 2005), por lo que constituyen un riesgo potencial de contaminación con estas sustancias para la quebrada.

La captación del acueducto de Curubandé, distrito del cantón de Liberia, de la provincia de Guanacaste de Costa

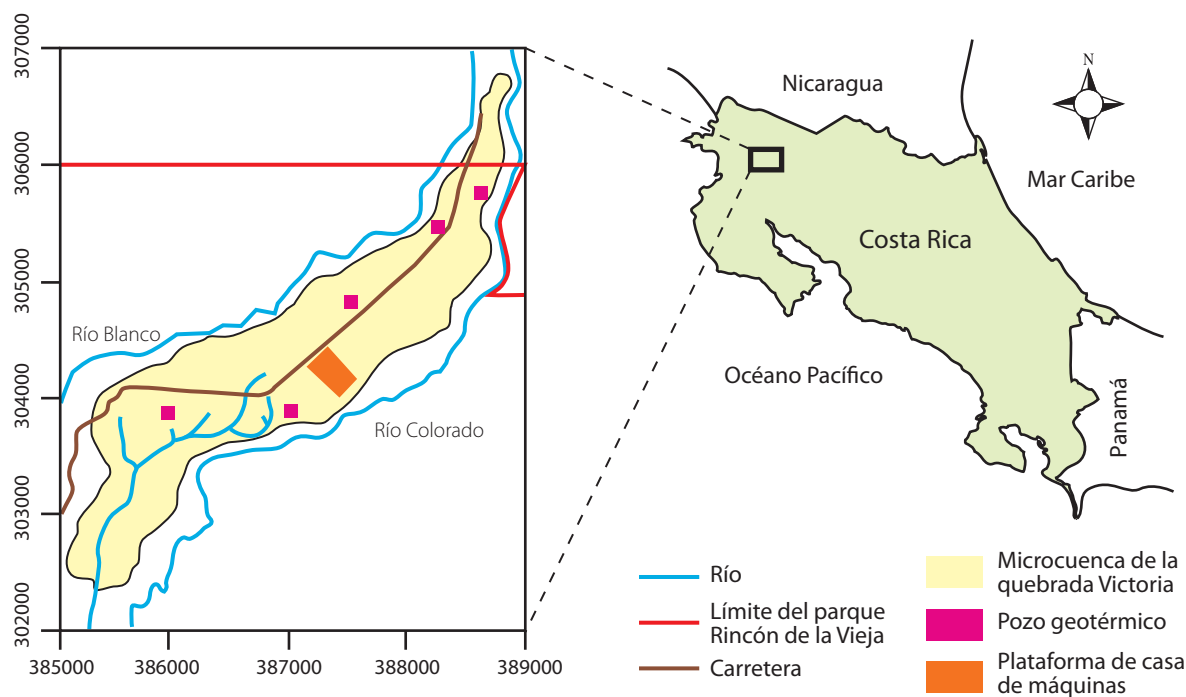


FIG. 1. Microcuenca de la quebrada Victoria, 2007-2008, Costa Rica.

Rica, que abastecía en el 2002 a una población de 1812 personas (INEC 2002), se ubica en la parte baja de la microcuenca de la quebrada Victoria. Por esto, la caracterización geoquímica de estas aguas permite determinar la futura degradación de su calidad por las actividades humanas que se desarrollan en su parte media y alta (Bianchini et al. 2005). Aunado a esto, el uso de índices de calidad del agua es una herramienta comunicativa y entendible para los diferentes actores involucrados en el manejo y la gestión del recurso hídrico.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad del agua de la quebrada Victoria, mediante la aplicación de índices y caracterización química, para establecer una línea base para los programas de seguimiento de los efectos del desarrollo geotérmico en la microcuenca.

METODOLOGÍA

Sitios de muestreo

Se evaluaron 15 sitios de muestreo (Fig. 2, nacientes: sitios 5, 7, 9, 13, 14 y 15; toma del acueducto de Curubandé: sitio 1; lugares a lo largo de la quebrada: sitios 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11 y 12) comprendidos entre la naciente de la quebrada Victoria y la toma del acueducto de Curubandé. La selección de los sitios se basó en la identificación de las

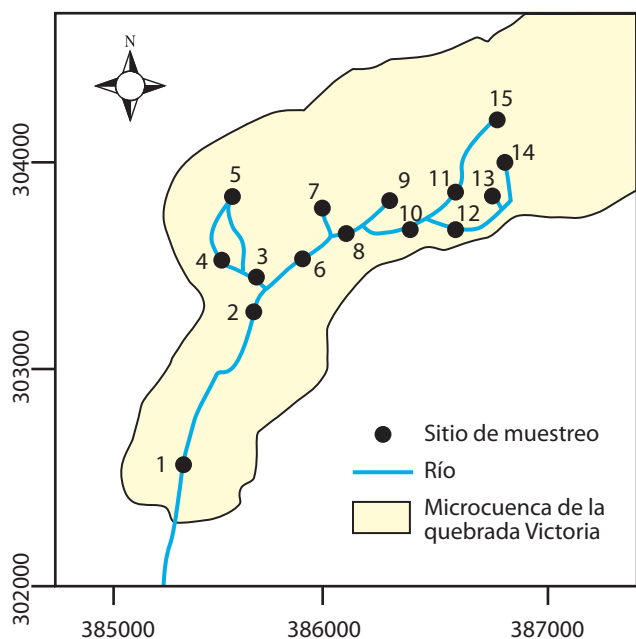


FIG. 2. Sitios de muestreo de la quebrada Victoria.

nacientes y los puntos a lo largo del cauce durante los recorridos efectuados en la época lluviosa de 2006 y seca de 2007. Se realizaron en total cinco muestreos: dos en la época lluviosa (11 de setiembre y 6 de noviembre de 2007), dos en la seca (29 de enero y 26 de febrero de 2008) y una en la transición seca a lluviosa (3 de junio de 2008).

Se recolectaron muestras simples comenzando por la parte baja de la microcuenca (del sitio 1 al 15), entre las 9:00 y 16:00 horas, siguiendo los protocolos de los métodos normalizados para aguas potables y residuales (Eaton et al. 2005). Se midieron *in situ*: la temperatura del ambiente (T_{amb}) con un termómetro de mercurio; el potencial del hidrógeno (pH), la temperatura (T_{H_2O}) y la conductividad eléctrica (CE) del agua con un medidor de multivariables portátil (WTW 330i, Alemana). Se midió el caudal con un molinete (Seba D-87600 Kaufbeuren, F12169, modelo Z6, Alemana) entre las 48 y 72 horas después del muestreo.

Muestreo y análisis de indicadores de calidad del agua

En cada muestreo se recolectaron por sitio de muestreo las siguientes muestras: dos de un litro, conservadas entre $4^{\circ}C$ y $10^{\circ}C$, para el análisis de los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO_5) con el método de Winkler; sólidos disueltos (TDS) por gravimetría; boro (B) por espectrofotometría de ultravioleta-visible con curcumina; fluoruro (F) con electrodo selectivo de iones; nitrato ($NO_3^- -N$), fosfato ($PO_4^{3-} -P$), sulfato (SO_4^{2-}) y cloruro (Cl^-) por cromatografía líquida de alta resolución. Además, una de 300mL para el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (PSO) por el método Winkler; una de 125mL, tapadas sin burbujas de aire, para el análisis de hidrogenocarbonato (HCO_3^-) por titulación ácido-base; una de 100mL, tratadas con ácido nítrico 50% vv-1, para la determinación de sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) por absorción atómica con llama; una de 100mL, tratadas con ácido clorhídrico 50% vv-1, para el análisis de nitrógeno amoniacal ($NH_4^+ -N$) con electrodo selectivo de iones; y una de 500mL como control. Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica del ICE (Guayabo de Bagaces, Guanacaste) según los métodos normalizados para aguas potables y residuales (Eaton et al. 2005) y del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA 2003). Adicionalmente, se recolectaron una de 200mL para el análisis de turbiedad (Turb) y una de 100mL en bolsa Whirl-pak, conservada entre $4^{\circ}C$ y $10^{\circ}C$, y transportada dentro de las 24 horas al Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en Puntarenas para la determinación de coliformes fecales (CF).

Criterios para evaluar la calidad del agua

La calidad del agua de la quebrada Victoria se evaluó a lo largo de su cauce mediante los índices: holandés de calidad del agua (IHCA-CR) (Cuadro 1, Costa Rica 2007) y el de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos (ICA-U.S.NSF) (Cuadro 2, NSF 2007) y se mapeó utilizando un sistema de información geográfica (SIG). El primero incorpora los parámetros: PSO, DBO₅ y NH₄⁺-N; mientras que, el segundo: PSO, CF, pH, DBO₅, cambio de temperatura del agua, PO₄³⁻-P, NO₃⁻-N, turbiedad y TDS. La clasificación del primero se basó en el total de puntos obtenidos por cada uno de los parámetros según el cuadro 3. El segundo consistió en la suma de los productos de los valores Q, obtenido interpolando en la curva de calidad de cada parámetro de acuerdo con su concentración, y el factor de ponderación (w) del cuadro 4, El resultado final se multiplicó por un factor de 1,11 debido que se usó ocho parámetros en vez de nueve, excluyendo el cambio de temperatura del agua.

El agua de la quebrada Victoria se clasificó según su grado de dureza total como carbonato de calcio (CaCO₃) de acuerdo con el cuadro 5 (Alvarado et al. 2000). Se calculó utilizando la media anual de los resultados de calcio y magnesio.

CUADRO 1
Clasificación de la calidad del agua según el IHCA-CR

Clase	Puntaje	Grado de contaminación	Color
1	< 3	Sin contaminación	Azul
2	4 - 6	Contaminación Incipiente	Verde
3	7 - 9	Contaminación moderada	Amarillo
4	10 - 12	Contaminación severa	Anaranjado
5	13 - 15	Contaminación muy severa	Rojo

CUADRO 2
Clasificación de la calidad del agua según el ICA-U.S.NSF

Puntaje	Calidad del agua	Color
91 - 100	Excelente	Azul
71 - 90	Buena	Verde
51 - 70	Media	Amarillo
26 - 50	Mala	Anaranjado
0 - 25	Muy mala	Rojo

CUADRO 3
Asignación de puntos por parámetro según el IHCA-CR

Punto	PSO (%)	DBO ₅ (mgL ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N (mgL ⁻¹)
1	91-100	≤ 3	< 0,50
2	71-90; 111-120	3,1 – 6,0	0,50 – 1,0
3	51-70; 121-130	6,1 – 9,0	1,1 – 2,0
4	31-50	9,1 – 15	2,1 – 5,0
5	≤ 30 y > 130	> 15	> 5,0

CUADRO 4
Factor de ponderación para los parámetros del ICA-U.S.NSF

Parámetro	Factor de ponderación
Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%)	0,17
Coliformes fecales (NMP100 mL ⁻¹)	0,16
pH (unidades)	0,11
Demanda bioquímica de oxígeno (mgL ⁻¹)	0,11
Cambio de temperatura (°C)	0,10
Fosfatos totales (PO ₄ ³⁻ -P mgL ⁻¹)	0,10
Nitratos (NO ₃ ⁻ , mgL ⁻¹)	0,10
Turbiedad (UNT)	0,08
Sólidos disueltos (mgL ⁻¹)	0,07

CUADRO 5
Clasificación del agua según su dureza total como carbonato de calcio

Concentración en mgL ⁻¹ como CaCO ₃	Grado de dureza total	Color
0 – 60	Blanda	Morado
61 – 120	Moderadamente dura	Verde
121 – 180	Dura	Amarillo
> 180	Muy dura	Rojo

El agua de la quebrada Victoria se caracterizó geoquímicamente utilizando la media de los resultados de los dos muestreos de la época seca y empleando el programa Aquachem 4.0.272 (Waterloo Hydrogeologic 2003). La clasificación se realizó a partir de la relación de aniones (HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) y cationes mayoritarios (Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) en los siguientes tipos de agua: sulfatada cálcica ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$); sulfatada cálcica-magnésica ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$); o mezclas de agua sulfatada ($\text{SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ y $\text{SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{Na}^+$) y hidrogenocarbonatada ($\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ y $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{Na}^+$).

Análisis estadístico

La normalidad de los resultados de los parámetros fue analizada aplicando la prueba estadística de Shapiro-Wilks, modificado por Mahibbur y Govindarajulu en 1997, y utilizando el programa de InfoStat versión 1.1 Universidad Nacional de Córdoba 2002. La hipótesis nula (H_0) planteada fue: los datos siguen una distribución normal.

Para la homocedasticidad de las varianzas se empleó la prueba de Levene, la cual consistió en efectuar el análisis de varianza a los valores absolutos de los residuos de cada

parámetro y las épocas de muestreo como variable de clasificación. La H_0 fue: las varianzas de las poblaciones son iguales.

Si no se rechazan las dos hipótesis anteriores se aplica el análisis de varianza, de lo contrario se usa la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para la siguiente H_0 : hay diferencias significativas en los parámetros indicadores de calidad del agua de la quebrada Victoria entre las épocas de muestreo: lluviosa de 2007, seca y transición seca a lluviosa de 2008.

RESULTADOS

Parámetros e índices de calidad del agua

Los resultados de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos del agua de la quebrada Victoria obtenidos en cada uno de los muestreos se presentan en los Apéndices 1, 2 y 3. Se reporta la incertidumbre media, la media y desviación estándar de cada parámetro. Los resultados de la aplicación del IHCA-CR y el ICA-U.S.NSF al agua de la quebrada se muestran en los cuadros 6 y 7.

CUADRO 6

Puntaje obtenido de la aplicación del IHCA-CR a la quebrada Victoria, 2007-2008

Sitio	I época lluviosa	II época lluviosa	I época seca	II época seca	Transición seca a lluviosa
1	4	3	3	3	3
2	4	3	3	3	3
3	4	3	3	3	3
4	4	3	3	3	4
5	5	5	5	5	5
6	4	3	4	4	4
7	4	4	4	4	4
8	4	3	3	3	3
9	4	4	4	4	4
10	4	3	3	3	3
11	4	3	3	3	4
12	4	3	3	3	3
13	5	4	5	4	5
14	4	3	4	3	4
15	5	5	5	5	6

CUADRO 7

Puntaje obtenido de la aplicación del ICA-U.S.NSF a la quebrada Victoria, 2007-2008

Sitio	I época lluviosa	II época lluviosa	I época seca	II época seca	Transición seca a lluviosa
1	79	84	86	87	78
2	80	82	84	87	85
3	73	75	79	85	73
4	72	70	79	85	73
5	76	74	70	75	64
6	81	78	83	86	80
7	78	84	84	84	76
8	85	79	88	81	81
9	86	74	82	66	78
10	87	80	86	76	79
11	79	79	82	80	77
12	86	*	85	82	78
13	82	79	78	76	69
14	86	84	83	83	78
15	83	86	82	82	80

* sin dato.

El grado de contaminación más alto de la quebrada Victoria, según el IHCA-CR, fue en el primer muestreo de la época lluviosa de 2007, en la cual todos los sitios presentaron contaminación incipiente como se muestra en el recuadro I de la figura 3. A partir del segundo muestreo de la época lluviosa disminuyó (recuadro II con 33% de los sitios) y, posteriormente, se incrementó en los siguientes dos muestreos de la época seca (recuadro III con 47% de los

sitios; recuadro IV con 40% de los sitios) hasta la época de transición seca a lluviosa (recuadro V con 60% de los sitios).

La calidad del agua de la quebrada Victoria, según el ICA-U.S.NSF, se mantuvo en buena en todas las épocas de muestreo como se muestra en la figura 4, con la excepción de un caso puntual en los siguientes cuatro muestreos (sitio 4 del recuadro II, sitio 5 del recuadro III, sitio 9 del recuadro IV y sitio 5 del recuadro V) que se deterioró a una calidad media.

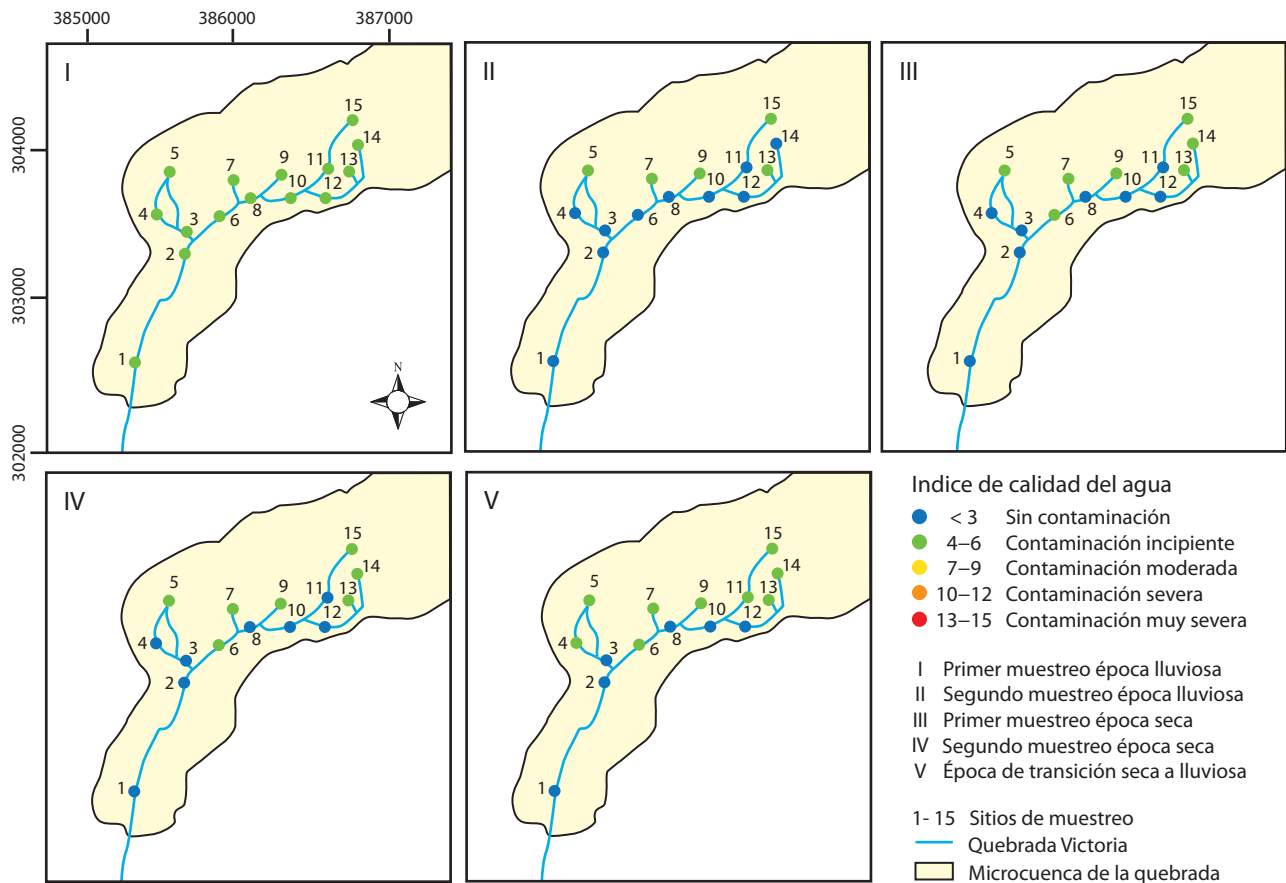


FIG. 3. Clasificación del agua de la quebrada Victoria, 2007-2008, según el índice holandés de calidad del agua.

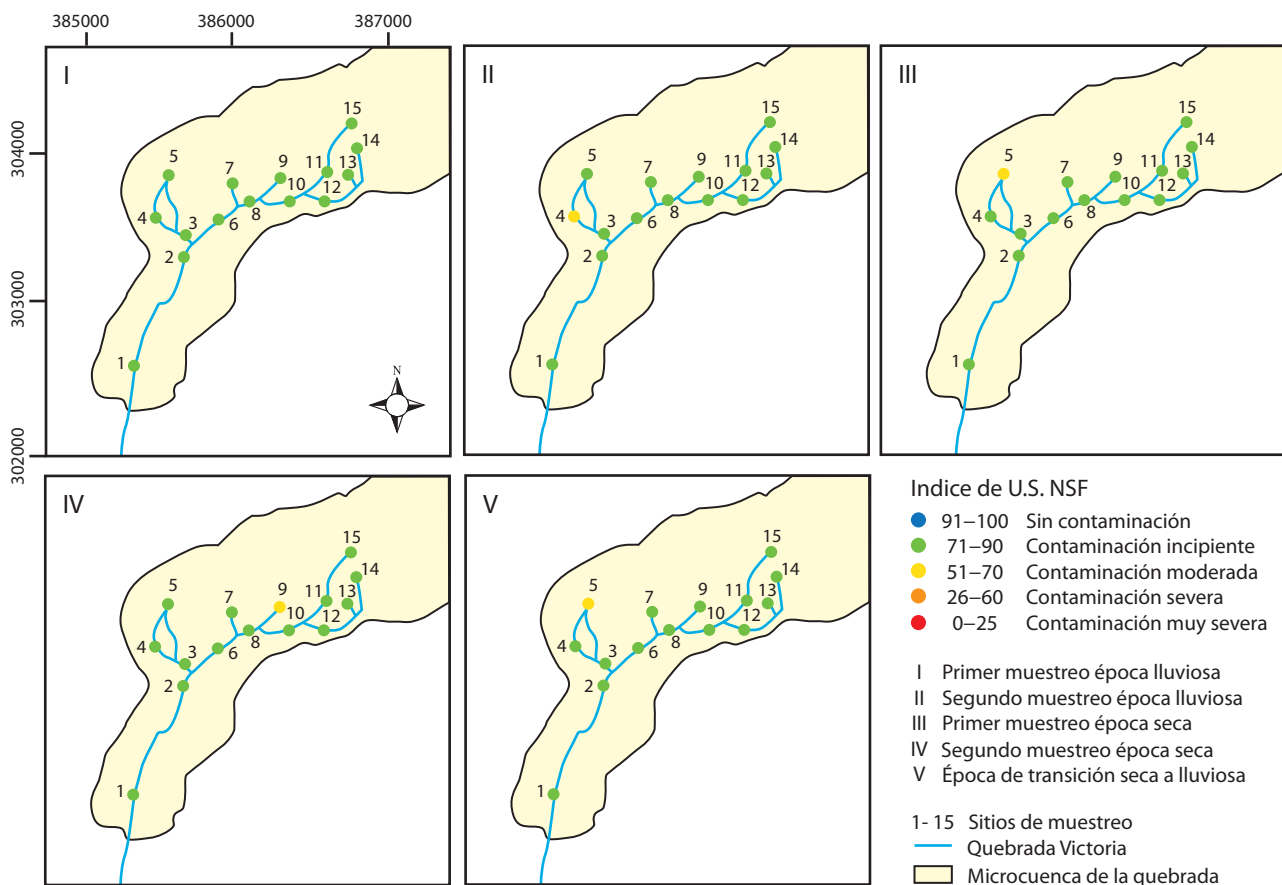


FIG. 4. Clasificación del agua de la quebrada Victoria, 2007-2008, según el índice de calidad del agua de la U.S.NSF.

Sin dato: sitio 12 del recuadro II.

Caracterización química

El agua de la quebrada Victoria según su dureza total como CaCO_3 se clasificó en moderadamente dura y blanda, como se muestra en la figura 5. El 87% de los sitios presentaron una media anual entre 68mgL^{-1} y 82mgL^{-1} de CaCO_3 y el 13% de los sitios entre 33mgL^{-1} y 52mgL^{-1} de CaCO_3 .

El tipo de agua que predominó en la quebrada Victoria, según su caracterización geoquímica, en la época seca de 2008 fue la sulfatada cálcica-magnésica (47% de los sitios), seguida de la sulfatada cálcica (27% de los sitios) y el restante (26% de los sitios) en mezclas de aguas sulfatadas y hidrogenocarbonatadas, como se presenta en la figura 6,

Análisis estadístico

Los resultados de los parámetros, con la excepción del Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , F^- y temperatura del agua, no siguieron una distribución normal, según la prueba de Shapiro-Wilks modificado por Mahibbur y Govindarajulu en 1997, como se presenta en el cuadro 8. La prueba de Levene indicó que las varianzas de la mayoría de las poblaciones de los datos no son iguales. Por lo anterior, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, obteniendo el siguiente resultado: no se rechaza la hipótesis nula para los parámetros de turbiedad, oxígeno disuelto y coliformes fecales; y se rechaza para los demás parámetros al 5% de significación. Los datos cuyos resultados estuvieron por debajo de

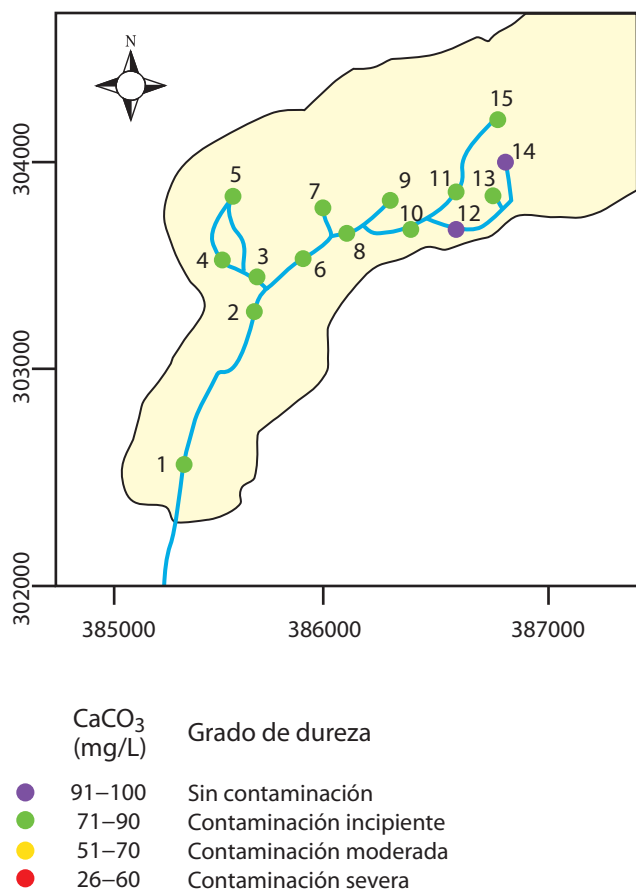


FIG. 5. Clasificación del agua de la quebrada Victoria según su dureza total media anual, 2007-2008.

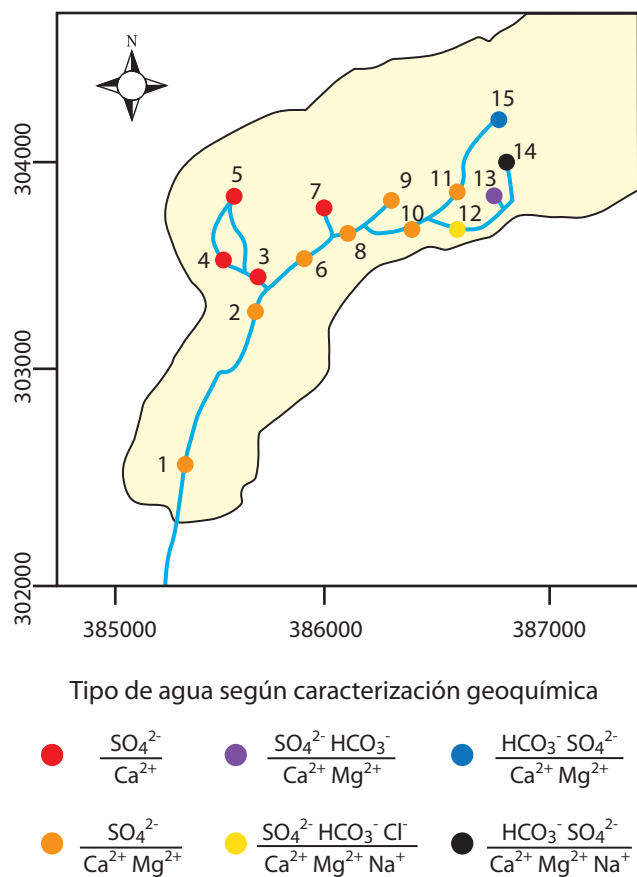


FIG. 6. Clasificación del agua de la quebrada Victoria según su caracterización geoquímica en la época seca de 2008.

sus límites de cuantificación no se aplicaron estas pruebas estadísticas, tales como el B, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N y DBO₅.

DISCUSIÓN

Evaluación de la calidad del agua

Los índices de calidad del agua permite la valoración general del cuerpo de agua mostrando la variación espacial y temporal por medio de una fácil interpretación de categorías.

El deterioro en la calidad del agua, según el IHCA-CR, de la quebrada Victoria en la época lluviosa (recuadro I de la figura 3) y de transición seca a lluviosa (recuadro V), indica que puede comprometer la vida acuática.

Esta degradación mejora en la época seca (recuadros III y IV), cambiando de un grado de contaminación incipiente a uno sin contaminación, en los sitios a lo largo de la quebrada.

Al segregar el IHCA-CR, se encuentran que los resultados de la DBO₅ y el NH₄⁺-N indican que la contaminación por materia orgánica y nitrogenada es baja. El parámetro que contribuyó al deterioro de este índice fue el PSO, el cual según el análisis estadístico (Cuadro 8), difieren entre las épocas de muestreo, lo que explica su variación estacional. La disminución del PSO en las nacientes (Apéndice 2) concuerda con valores bajos de caudal en la época seca, debido a una menor aireación del medio.

El aumento del PSO a lo largo de la quebrada (recuadros II, III y IV de la figura 3) en comparación con las nacientes justifica la variabilidad espacial del índice. Este

CUADRO 8

Resultados de la aplicación de las pruebas estadísticas a los datos obtenidos de la quebrada Victoria

Parámetro	Prueba de Shapiro-Wilks		Prueba de Levene		Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis	
	W	p-valor	F	p-valor	H	p-valor
PSO	0,78	<0,0001	7,44	0,0013	6,18	0,0450
CF	0,46	<0,0001	1,52	0,2275	6,30	0,0414
pH	0,84	<0,0001	0,18	0,8349	0,93	0,6275
Turbiedad	0,81	<0,0001	11,91	<0,0001	9,56	0,0084
TDS	0,94	0,0060	0,17	0,8455	1,63	0,4430
Dureza total	0,85	<0,0001	2,22	0,1176	3,23	0,1979
HCO ₃ ⁻	0,86	<0,0001	4,97	0,0103	0,06	0,9694
Cl ⁻	0,97	0,3578	5,85	0,0049	2,68	0,2620
SO ₄ ²⁻	0,92	0,0010	3,62	0,0333	1,96	0,3745
Na ⁺	0,95	0,0195	5,86	0,0049	2,99	0,2225
Ca ²⁺	0,84	<0,0001	0,35	0,7082	5,39	0,0670
Mg ²⁺	0,98	0,7388	1,55	0,2202	0,09	0,9575
F ⁻	0,96	0,1655	2,34	0,1060	2,48	0,2896
T H ₂ O	0,97	0,5752	1,66	0,1996	3,16	0,2045
CE	0,94	0,0060	0,26	0,7703	5,51	0,0635
Caudal	0,81	<0,0001	24,64	<0,0001	5,64	0,0596

aumento coincide con el incremento del caudal en la quebrada (Apéndice 1) en el segundo muestreo de la época lluviosa, que conlleva a una mayor aireación del sistema y mejora el índice, situación que se mantiene en la época seca. Este comportamiento concuerda con lo encontrado por Calvo y Mora (2007) en los ríos Tárcoles y Reventazón de Costa Rica.

La calidad del agua de la quebrada Victoria es buena, según el ICA-U.S.NSF. Dicho índice ha sido aplicado en México en la cuenca del río Amajac obteniendo una calidad media y mala (Alvarez et al. 2006). En Oregon de los Estados Unidos, este índice fue modificado por Cude (2001), agregando el amoníaco al nitrato, como una herramienta comunicativa sobre la calidad general del agua y es aplicable para todos los usos. En Costa Rica, se ha aplicado, excluyendo el pH y TDS y con una clasificación asociada al grado de contaminación (Peinador 2004), para correlacionarlo con macroinvertebrados como bioindicadores en 33 ríos del país, dentro de los cuales el más cercano a la microcuenca en estudio fue el de Liberia que se clasificó en una categoría de aguas muy contaminadas.

De los cinco muestreos efectuados, cuatro presentaron un caso puntual de deterioro en la calidad del agua de la quebrada, de buena a media, en los sitios 4, 5 y 9 (recuadros II, III, IV y V de la figura 4). Por esto, es necesario segregar el ICA-U.S.NSF para analizar detalladamente sus parámetros e identificar los que están siendo afectados por los cambios en su calidad. Los parámetros que difieren entre las épocas de muestreo, según el análisis estadístico (cuadro 8), fueron la turbiedad, el PSO y los CF.

Los sitios 5 y 9 son nacientes, por lo que en relación con el PSO, presentan el mismo comportamiento que el observado en el IHCA-CR. El incremento tanto de los CF como la turbiedad en los sitios 4 y 9 coincide con el aumento del caudal (Apéndices 1, 2 y 3) en la época lluviosa y de transición seca a lluviosa.

Otro parámetro que contribuyó al deterioro de la calidad, según el ICA-U.S.NSF, fue el pH del sitio 5, el cual se caracterizó por ser ácido (entre 3,90 y 9,17). Esta condición es natural de la naciente, por lo que no es adecuado incluirse en el índice para el seguimiento de efectos de

actividades humanas debido a la variabilidad geológica de cada cuenca (Cude 2001). Su inclusión es útil para analizar tendencias en una misma cuenca, pero no para hacer comparaciones espaciales.

Es importante destacar que el ICA-U.S.NSF fue desarrollado para cuerpos de agua frías y en donde hay diferencias estacionales bien marcadas, por lo tanto, parámetros como el cambio de temperatura y el PSO afectan la reproducción de las especies acuáticas y los requerimientos mínimos para su supervivencia (Cude 2001, Smith et al. 2002). En este caso, por estar la quebrada influenciada por el desarrollo geotérmico, el cambio de temperatura del agua es un parámetro importante para detectar contaminación térmica considerando como referencia la temperatura media anual (25,0°C).

El IHCA-CR categoriza los cuerpos de agua superficiales según su grado de contaminación de acuerdo con el contenido de contaminación orgánica y nitrogenada, cuyo efecto en el sistema acuático se evalúa mediante el PSO. Estas condiciones se reflejan en las aguas superficiales que reciben descargas de aguas residuales productos de las actividades humanas, como los sitios evaluados por Calvo & Mora (2007).

En cuanto al ICA-U.S.NSF en la quebrada Victoria, no se observaron diferencias significativas, según el análisis estadístico (cuadro 8), en la DBO_5 , $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ y TDS. La conductividad del agua da una apreciación de la concentración de los iones en disolución y está relacionada con el TDS (Orozco et al. 2005). Además, su medición es rápida y sencilla en comparación con el TDS. Por estas razones, se sugiere incluir la conductividad, la cual se incluyó en el índice desarrollado por Pérez-Castillo y Rodríguez (2008), en los programas de seguimiento de calidad del agua.

Caracterización química del agua

El consumo de agua dura, de más de 120mgL^{-1} de CaCO_3 , está asociado con el riesgo de padecer cálculos de las vías urinarias inferiores y se han encontrado casos en las provincias de Guanacaste y Puntarenas de Costa Rica (Alvarado et al. 2000). Además, se ha reportado hasta el 2004 en Curubandé enfermedades de riñones y de las vías urinarias (ICE 2005). Por estas razones y debido a que el acueducto de este distrito se encuentra en la quebrada Victoria, se debe mantener la vigilancia y seguimiento de la calidad de esta agua, que se caracteriza por ser moderadamente dura (Fig. 5).

Las sustancias tóxicas, como boro y fluoruro, no fueron incluidas en los índices evaluados, por lo que deben ser evaluados individualmente previo al análisis de los índices. Pérez-Castillo & Rodríguez (2008) desarrollaron uno

similar al ICA-U.S.NSF pero que se fija automáticamente en cero, si la concentración de alguna sustancia tóxica excede el límite máximo permisible. Esto permite emitir una alarma de acción inmediata al gestor del recurso hídrico.

Los valores de boro encontrados en el agua de la quebrada Victoria estuvieron por debajo de $0,1\text{mgL}^{-1}$, el cual, en caso de ser utilizado para el riego, no compromete a los cultivos sensibles, semitolerante y tolerantes, cuyos límites máximos son de $0,3\text{mgL}^{-1}$, $0,7\text{mgL}^{-1}$ y $1,0\text{mgL}^{-1}$, respectivamente (Custodio & Díaz 2001).

Las concentraciones de fluoruro en el agua de la quebrada Victoria estuvieron entre $0,07\text{mgL}^{-1}$ y $0,57\text{mgL}^{-1}$, ámbito que se encuentra por debajo de $1,5\text{mgL}^{-1}$, a partir del cual conlleva a la fluorosis dental y esquelética (Piris da Motta et al. 2003). El contenido encontrado en el agua de la quebrada protege a los consumidores, en este caso de Curubandé, de la aparición de caries dentales, especialmente en niños, siempre y cuando sea menos de $1,0\text{mgL}^{-1}$ (Sawyer et al. 2001).

El tipo dominante de agua de la quebrada Victoria fue sulfatada cálcica-magnésica (Fig. 6). Los fluidos de los pozos geotérmicos del campo geotérmico Las Pailas (Fig. 1) en condiciones de presión atmosférica son del tipo clorurados sódicos y de alta concentración salina (Chavarría et al. 2006). La química de las aguas termales de las faldas del volcán Rincón de la Vieja se caracteriza por ser clorurada-sulfatada ácida, sulfatada ácida y clorurada neutra (Kempter & Rowe 2000). Estas aguas tienen propiedades químicas muy diferentes, razón por la cual permite dar seguimiento a su origen si se presentan infiltración o mezclas.

El sitio 12 (Fig. 6) se caracteriza por tener una mezcla de agua tipo sulfatada-hidrogenocarbonatada, que es específica del sitio 13, y de un tipo clorurada sódica, la cual es proveniente de las aguas geotérmicas. Dogdu & Bayari (2005) detectaron que la calidad físico-química de las aguas superficiales de la cuenca de Akarcay, Turquía, se deterioró por la intrusión de aguas termales durante la producción de pozos en los sitios cercanos a los campos geotérmicos. Esto pudo haber ocurrido con el pozo geotérmico que se encuentra cercano y en la parte alta del sitio 12 (Fig. 1).

Desde el punto de vista geoquímico, el cloruro es un elemento "conservativo", es decir, que tiene largos tiempos de retención y es muy soluble en el agua (Giggenbach & Goguel 1989), por lo que puede servir como trazador para el seguimiento de derrames o infiltración de fluidos geotérmicos hacia la quebrada. La diferencia en dos órdenes de magnitud en su concentración: las aguas de la quebrada Victoria presentan entre $4,2\text{mgL}^{-1}$ y $18,7\text{mgL}^{-1}$ (Apéndices 1, 2 y 3); mientras que, las de los pozos geotérmicos entre

6000mgL⁻¹ y 7000mgL⁻¹ (ICE 2005), sirve como indicador de una posible contaminación por aguas geotérmicas.

La calidad del agua de la quebrada Victoria se clasificó en una clase 1 (sin contaminación) en la época seca de 2007 y se deterioró a una clase 2 (contaminación incipiente), entre 40% y 60% de los sitios, en la época lluviosa de 2007 y de transición seca a lluviosa de 2008, según el índice holandés de calidad del agua del Reglamento costarricense para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales (IHCA-CR).

El agua de la microcuenca de la quebrada Victoria fue de calidad buena (entre 71 y 90 puntos), según el índice de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos (ICA-U.S.NSF), durante el año hidrológico 2007-2008, por lo que fue adecuada para la conservación de sistemas acuáticos.

Para los programas de seguimiento de la calidad del agua de la quebrada Victoria y de efectos del desarrollo geotérmico, como principal actividad en la microcuenca, debe incluir los siguientes indicadores: de contaminación fecal, los coliformes fecales; de calidad física, la turbiedad; del estado de los sistemas acuáticos, el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto; del contenido de sales disueltas, la conductividad; de contaminación térmica, la temperatura del agua; de trazador de aguas geotérmicas, el cloruro.

Se recomienda complementar la evaluación de la calidad del agua de la quebrada Victoria con indicadores e índices biológicos para tener una visión completa de la salud del agua y de los sistemas acuáticos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y al Laboratorio de Geoquímica del Instituto Costarricense de Electricidad por su apoyo a la investigación.

REFERENCIAS

- Alvarado, D, N. Alfaro, & F. Portuguese. 2000. Cálculos en las vías urinarias y su relación con el consumo de calcio en el agua de bebida en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública* 9:61-70.
- Alvarez, A., J. Rubiños, F. Gavi, J. Alarcón, E. Hernández, C. Ramírez, E. Mejía, F. Pedrero, E. Nicolas & F. Salazar. 2006. Índice de calidad del agua en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México: Diagnóstico y Predicción. *International Journal of Experimental Botany* 75:71-83.
- Arcos, M.P., S.L. Ávila de Navia, S.M. Estupiñán & A.C. Gómez. 2005. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *Nova Publicación Científica* 3: 69-79.
- Bianchini, G., M. Pennisi, R. Cioni, A. Muti, N. Cerbi & W. Kloppmann. 2005. Hydrochemistry of the high-boron groundwaters of the Cornia aquifer (Tuscany, Italy). *Geothermics* 34:297-319.
- Calvo, G. & J. Mora. 2007. Evaluación y clasificación preliminar de la calidad de agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. Parte III: Calidad de cuerpos receptores de agua, según el Sistema Holandés de Valoración. *Tecnología en Marcha* 20:59-67.
- Chapman, D. 1996. *Water Quality Assessment: a Guide to Use of Biota Sediments and Water in Environmental Monitoring*. UNESCO, WHO, UNEP. Londres, Reino Unido.
- Chavarría, L., P. Mora, E. Hakanson, F. Molina, E. Vega, Y. Torres, O. Vallejos, A. Yock, G. Lezama & S. Castro. 2006. *Miravalles Consulting Panel Meeting Development Strategies of the Pailas Geothermal Field*. Instituto Costarricense de Electricidad, Guanacaste, Costa Rica.
- Costa Rica. 2007. Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. *La Gaceta* 178:1-7.
- Cude, C. 2001. Oregon Water Quality Index: A Tool for Evaluating Water Quality Management Effectiveness. *Journal of the American Resources Association* 37:125-137.
- Custodio, E. & E. Díaz. 2001. *Hidrología Subterránea*. Omega, Barcelona, España.
- Dogdu, M. & C. Bayari. 2005. Environmental impact of geothermal fluid on surface water, groundwater and streambed sediments in the Akarçay Basin, Turkey. *Environmental Geology* 47:352-340.
- Eaton, A., L. Clesceri, E. Rice & A. Greenberg. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Centennial, Washington, EEUU.
- Giggenbach, W.F. & R.L. Goguel. 1989. *Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharges*. Department of Scientific and Industrial Research, Petone, Nueva Zelanda.
- IAEA (International Agency Energy Atomic). 2003. *A compilation of Laboratory Procedures for the Chemical Analysis of Geothermal Water Samples*. Vienna, Austria.
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 2005. Estudio de impacto ambiental proyecto geotérmico Las Pailas. Tomo I, Expediente SETENA N° 788-04, San José, Costa Rica.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2002. IX Censo nacional de población: características sociales y demográficas. Instituto Nacional de Estadística y Censos, San José, Costa Rica.
- Kempton, K.A. & Rowe, G.L. 2000. Leakage of Active Crater Lake Brine through the North Flank at Rincon de la Vieja Volcano, Northwest Costa Rica, and Implications for Crater Collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 97:143-159.

- NSF (National Sanitation Foundation). 2007. Water Quality Index. Michigan, US. (http://www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp; consultado 22 agosto 2008)
- Orozco, B.C., S.A. Pérez, D.M. González, V.F. Rodríguez & B.J. Alfayate. 2005. Contaminación Ambiental: una visión desde la química. Thomson, Madrid, España.
- Peinador, M. 2004. Relación entre los macroinvertebrados benthicos y la calidad del agua en ríos de Costa Rica. *Revista Evolución del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados* 2:1-23.
- Pérez-Castillo, A. & A. Rodríguez. 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista Biología Tropical* 56:1905-1918.
- Piris da Motta, M.R., C. Zacharzewski, J. Miño, M. Bordenave, L. Rinaldi, P.D. Iurinic, A. Piaggio, M. Morchio, M. Montiel, M.C. Alberto, S. Bracco, M. Koziarski, J.C. Kempski, S. Kuhlmann, G. Freitag, G. Okulovich & L. Santader. 2003. Influencia de factores socioeconómicos y culturales en la asociación entre índices de caries dental y la fluoruración del agua potable. Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente, 9-11 de setiembre, Buenos Aires, Argentina.
- Samboni, N., Y. Carvajal & J. Escobar. 2007. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista de Ingeniería e Investigación* 27:172-181.
- Sancha, A.M. & C. Espinoza. 2001. Determinación de contenido natural e índices de calidad: ¿presente y futuro de calidad de aguas? XIV Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 11-14 de octubre, Santiago.
- Sawyer, C.N., P.L. McCarty & G.F. Parking. 2001. Química para ingeniería ambiental. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia.
- Smith, D., R. Javies-Colley & J. Nagels. 2002. Oregon Water Quality Index: A Tool for Evaluating Water Quality Management, by Curtis G. Cude. *Journal of the American Water Resources Association* 38:313-314.
- Tassi, F., O. Vaselli, B. Capaccioni, C. Giolito, E. Duarte, E. Fernández, A. Minissale & G. Magro. 2005. The hydrothermal-volcanic system of Rincon de la Vieja volcano (Costa Rica): A combined (inorganic and organic) geochemical approach to understanding the origin of the fluid discharges and its application to volcanic surveillance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 148:315-333.
- Waterloo Hydrogeologic. 2003. Aquachem 4.0.272, Waterloo Hydrogeologic, Ontario, Canada.
- WWPA (Programa Mundial de evaluación de los Recursos Hídricos, FR). 2003. Primer Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Resumen Ejecutivo. Agua para Todos, Agua para la Vida. (http://www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml; consultado 20 julio, 2007).

APÉNDICE 1

Parámetros físico-químicos y bacteriológicos del agua de la quebrada Victoria obtenidos en los dos muestreos de la época lluviosa de 2007

Parámetro (incertidumbre)	NM	Sitio de muestreo															Media	D.E.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
PSO (±1 %)	I	101	101	99	97	56	95	89	95	83	93	92	93	68	88	58	87	15
	II	99	100	98	94	53	90	85	96	78	93	93	92	69	92	56	86	15
DBO ₅ (mgL ⁻¹)	I	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
	II	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
NH ₄ ⁺ -N (mgL ⁻¹)	I	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
	II	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
CF (NMP/100 mL-1)	I	4	9	23	23	23	23	0	23	23	23	150	93	43	240	0	23	66
	II	0	0	0	0	0	4	0	350	75	4600	240	430	99	99	0	4	1172
pH (±0,01)	I	5,62	5,77	3,99	3,85	3,70	5,66	3,92	6,57	5,70	6,43	6,45	7,06	5,89	6,68	5,84	5,54	1,13
	II	6,05	5,78	4,11	4,03	3,93	5,73	4,09	6,38	5,19	6,19	6,45	6,66	6,05	6,50	5,82	5,53	1,00
PO ₄ ³⁻ -P (mgL ⁻¹)	I	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
	II	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
NO ₃ ⁻ -N (±0,01 mgL ⁻¹)	I	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	0,49	0,38	0,18	0,44	<0,09	0,39	0,46	0,32	0,51	0,13	0,74	0,40	0,17
	II	0,34	0,23	1,11	0,40	0,28	0,29	0,15	0,37	<0,09	0,30	0,73	0,27	0,48	0,15	0,68	0,41	0,26
Turbiedad (±0,01 UNT)	I	4,06	3,46	1,26	0,46	0,24	2,74	0,14	2,31	1,23	3,20	1,56	3,68	0,70	0,14	1,49	1,78	1,37
	II	3,00	3,00	0,50	0,20	0,30	2,50	0,10	1,90	1,20	2,50	2,50	1,20	0,50	5,00	0,40	1,65	1,42
TDS (±8 mgL ⁻¹)	I	232	232	246	234	234	232	258	198	200	218	218	172	192	138	186	213	32
	II	232	230	234	240	240	230	254	218	210	218	214	180	190	148	182	215	28
Dureza total CaCO ₃ (±3 mgL ⁻¹)	I	74	75	75	71	72	75	80	72	73	74	78	53	65	35	66	69	11
	II	84	83	80	76	76	81	84	77	77	80	83	61	71	37	69	75	12
HCO ₃ ⁻ (±1 mgL ⁻¹)	I	2	1	<1	1	1	10	1	18	20	19	18	28	32	29	45	16	14
	II	<1	2	1	<1	1	8	1	16	8	17	20	29	34	28	47	16	15
Cl ⁻ (±0,1 mgL ⁻¹)	I	11,4	11,4	11,3	11,7	10,2	10,9	10,0	10,4	8,0	9,9	9,4	12,8	7,6	5,7	6,9	9,8	2,0
	II	12,8	11,4	12,8	11,4	11,4	11,3	10,5	10,6	9,5	10,1	10,2	12,1	8,2	5,7	7,7	10,4	2,0
SO ₄ ²⁻ (±1 mgL ⁻¹)	I	83	84	96	97	94	71	100	62	67	59	66	29	44	14	34	67	27
	II	88	86	99	99	98	80	104	65	78	73	70	36	47	15	34	71	27

APÉNDICE 1 (Continuación...)

Parámetros físico-químicos y bacteriológicos del agua de la quebrada Victoria obtenidos en los dos muestreos de la época lluviosa de 2007

Na ⁺ ($\pm 0,4$ mgL ⁻¹)	I	8,3	8,3	7,9	7,8	7,5	8,5	8,3	8,2	8,6	8,0	8,0	9,2	7,1	5,8	7,0	7,9	0,8
	II	8,5	8,6	8,2	7,8	7,8	8,7	8,3	8,2	8,6	8,6	8,2	8,4	8,7	7,3	5,9	7,6	8,1
Ca ²⁺ ($\pm 0,5$ mgL ⁻¹)	I	21,3	21,5	22,4	21,3	21,4	21,1	23,9	19,9	20,5	20,3	21,7	13,4	17,3	8,0	17,2	19,4	4,1
	II	23,0	23,0	23,0	22,0	22,0	22,0	24,0	20,0	21,0	21,0	22,0	15,0	18,0	8,0	17,0	20,1	4,2
Mg ²⁺ ($\pm 0,2$ mgL ⁻¹)	I	5,1	5,1	4,7	4,4	4,5	5,4	4,9	5,5	5,2	5,6	5,8	4,7	5,3	3,6	5,5	5,0	0,6
	II	6,5	6,1	5,5	5,2	5,1	6,3	5,8	6,5	6,0	6,7	6,8	5,8	6,4	4,1	6,4	5,9	0,7
F ⁻ ($\pm 0,01$ mgL ⁻¹)	I	0,44	0,40	0,20	0,18	0,17	0,40	0,22	0,38	0,36	0,40	0,46	0,21	0,29	0,07	0,26	0,29	0,12
	II	0,34	0,32	0,20	0,19	0,17	0,40	0,21	0,45	0,35	0,47	0,47	0,22	0,29	0,07	0,24	0,29	0,12
B ($\pm 0,07$ mgL ⁻¹)	I	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
	II	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
T amb ($\pm 0,5$ °C)	I	24,0	27,0	27,0	29,0	26,0	28,0	28,0	28,0	28,0	27,0	27,0	28,0	28,0	28,0	28,0	27,4	1,2
	II	24,0	24,0	24,0	28,0	27,0	26,0	25,0	26,0	27,0	27,0	28,0	28,0	28,0	27,0	27,0	26,5	1,6
T H ₂ O ($\pm 0,1$ °C)	I	22,5	23,6	23,4	24,5	23,8	25,0	24,5	25,4	24,9	25,7	25,8	25,2	26,4	25,5	27,3	24,9	1,2
	II	23,5	24,6	24,0	25,0	24,3	25,5	25,3	25,5	25,5	26,0	25,6	25,8	26,0	25,5	27,0	25,3	0,9
CE (± 1 μ Scm ⁻¹)	I	230	236	264	263	244	213	262	200	206	185	205	162	175	100	166	207	45
	II	230	229	259	266	258	211	266	201	204	198	210	157	174	105	167	209	45
Caudal (m ³ s ⁻¹)	I	0,362	0,364	0,118	0,024	0,100	0,268	0,012	0,142	0,006	0,092	0,078	0,025	0,018	0,007	0,045	0,111	0,124
	II	0,370	0,394	0,115	0,033	0,112	0,223	0,018	0,192	0,015	0,156	0,107	0,043	0,016	0,017	0,060	0,125	0,124

CF: se reporta la mediana; NM: número de muestreo; I: setiembre y II: noviembre del 2007; D.E.: desviación estándar

APÉNDICE 2

Parámetros físico-químicos y bacteriológicos del agua de la quebrada Victoria obtenidos en los dos muestreos de la época seca de 2008

Parámetro (incertidumbre)	NM	Sitio de muestreo															Media	D.E.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
PSO (± 1 %)	I	101	101	99	97	56	95	89	95	83	93	92	93	68	88	58	87	15
	II	99	100	98	94	53	90	85	96	78	93	93	92	69	92	56	86	15
DBO ₅ (mgL ⁻¹)	I	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
	II	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
NH ₄ ⁺ -N (mgL ⁻¹)	I	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
	II	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
CF (NMP100 mL ⁻¹)	I	4	9	23	23	23	23	0	23	23	23	150	93	43	240	0	23	66
	II	0	0	0	0	4	4	0	350	75	4600	240	430	99	99	0	4	1172
pH ($\pm 0,01$)	I	5,62	5,77	3,99	3,85	3,70	5,66	3,92	6,57	5,70	6,43	6,45	7,06	5,89	6,68	5,84	5,54	1,13
	II	6,05	5,78	4,11	4,03	3,93	5,73	4,09	6,38	5,19	6,19	6,45	6,66	6,05	6,50	5,82	5,53	1,00
PO ₄ ³⁻ -P (mgL ⁻¹)	I	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
	II	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
NO ₃ ⁻ -N ($\pm 0,01$ mgL ⁻¹)	I	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	0,49	0,38	0,18	0,44	<0,09	0,39	0,46	0,32	0,51	0,13	0,74	0,40	0,17
	II	0,34	0,23	1,11	0,40	0,28	0,29	0,15	0,37	<0,09	0,30	0,73	0,27	0,48	0,15	0,68	0,41	0,26
Turbiedad ($\pm 0,01$ UNT)	I	4,06	3,46	1,26	0,46	0,24	2,74	0,14	2,31	1,23	3,20	1,56	3,68	0,70	0,14	1,49	1,78	1,37
	II	3,00	3,00	0,50	0,20	0,30	2,50	0,10	1,90	1,20	2,50	2,50	1,20	0,50	5,00	0,40	1,65	1,42
TDS (± 8 mgL ⁻¹)	I	232	232	246	234	234	232	258	198	200	218	218	172	192	138	186	213	32
	II	232	230	234	240	240	230	254	218	210	218	214	180	190	148	182	215	28
Dureza total CaCO ₃ (± 3 mgL ⁻¹)	I	74	75	75	71	72	75	80	72	73	74	78	53	65	35	66	69	11
	II	84	83	80	76	76	81	84	77	77	80	83	61	71	37	69	75	12
HCO ₃ ⁻ (± 1 mgL ⁻¹)	I	2	1	<1	1	1	10	1	18	20	19	18	28	32	29	45	16	14
	II	<1	2	1	<1	1	8	1	16	8	17	20	29	34	28	47	16	15
Cl ⁻ ($\pm 0,1$ mgL ⁻¹)	I	11,4	11,4	11,3	11,7	10,2	10,9	10,0	10,4	8,0	9,9	9,4	12,8	7,6	5,7	6,9	9,8	2,0
	II	12,8	11,4	12,8	11,4	11,4	11,3	10,5	10,6	9,5	10,1	10,2	12,1	8,2	5,7	7,7	10,4	2,0
SO ₄ ²⁻ (± 1 mgL ⁻¹)	I	83	84	96	97	94	71	100	62	67	59	66	29	44	14	34	67	27
	II	88	86	99	99	98	80	104	65	78	73	70	36	47	15	34	71	27

APÉNDICE 2 (Continuación...)

Parámetros físico-químicos y bacteriológicos del agua de la quebrada Victoria obtenidos en los dos muestreos de la época seca de 2008

Na ⁺ (±0,4 mgL ⁻¹)	I	8,3	8,3	7,9	7,8	7,5	8,5	8,3	8,2	8,6	8,0	8,0	9,2	7,1	5,8	7,0	7,9	0,8	
	II	8,5	8,6	8,2	7,8	7,8	8,7	8,3	8,2	8,6	8,2	8,4	8,4	8,7	7,3	5,9	7,6	8,1	0,7
Ca ²⁺ (±0,5 mgL ⁻¹)	I	21,3	21,5	22,4	21,3	21,4	21,1	23,9	19,9	20,5	20,3	21,7	13,4	13,4	17,3	8,0	17,2	19,4	4,1
	II	23,0	23,0	23,0	22,0	22,0	22,0	24,0	20,0	21,0	21,0	22,0	15,0	15,0	18,0	8,0	17,0	20,1	4,2
Mg ²⁺ (±0,2 mgL ⁻¹)	I	5,1	5,1	4,7	4,4	4,5	5,4	4,9	5,5	5,2	5,6	5,8	4,7	5,3	3,6	5,5	5,0	0,6	
	II	6,5	6,1	5,5	5,2	5,1	6,3	5,8	6,5	6,0	6,7	6,8	5,8	5,8	6,4	4,1	6,4	5,9	0,7
F ⁻ (±0,01 mgL ⁻¹)	I	0,44	0,40	0,20	0,18	0,17	0,40	0,22	0,38	0,36	0,40	0,46	0,21	0,29	0,07	0,26	0,29	0,12	
	II	0,34	0,32	0,20	0,19	0,17	0,40	0,21	0,45	0,35	0,47	0,47	0,22	0,29	0,07	0,24	0,29	0,12	
B (±0,07 mgL ⁻¹)	I	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
	II	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
T amb (±0,5 °C)	I	24,0	27,0	27,0	29,0	26,0	28,0	28,0	28,0	28,0	27,0	27,0	28,0	28,0	28,0	28,0	27,4	1,2	
	II	24,0	24,0	24,0	28,0	27,0	26,0	25,0	26,0	26,0	27,0	28,0	28,0	28,0	28,0	27,0	27,0	26,5	1,6
T H ₂ O (±0,1 °C)	I	22,5	23,6	23,4	24,5	23,8	25,0	24,5	25,4	24,9	25,7	25,8	25,2	25,2	26,4	25,5	27,3	24,9	1,2
	II	23,5	24,6	24,0	25,0	24,3	25,5	25,3	25,5	25,5	26,0	25,6	25,8	25,8	26,0	25,5	27,0	25,3	0,9
CE (±1 µScm ⁻¹)	I	230	236	264	263	244	213	262	200	206	185	205	162	162	175	100	166	207	45
	II	230	229	259	266	258	211	266	201	204	198	210	157	157	174	105	167	209	45
Caudal (m ³ s ⁻¹)	I	0,362	0,364	0,118	0,024	0,100	0,268	0,012	0,142	0,006	0,092	0,078	0,025	0,025	0,018	0,007	0,045	0,111	0,124
	II	0,370	0,394	0,115	0,033	0,112	0,223	0,018	0,192	0,015	0,156	0,107	0,043	0,043	0,016	0,017	0,060	0,125	0,124

CF: se reporta la mediana; NM: número de muestreo; I: enero y II: febrero del 2008; D.E.: desviación estándar

APÉNDICE 3

Parámetros físico-químicos y bacteriológicos del agua de la quebrada Victoria obtenidos en el muestreo de la época de transición seca a lluviosa de 2008

Parámetro (incertidumbre)	Sitio de muestreo															Media	D.E.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
PSO (± 1 %)	96	93	94	90	54	88	84	92	85	91	87	91	65	89	50	83	15
DBO ₅ (mgL ⁻¹)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
NH ₄ ⁺ -N (mgL ⁻¹)	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
CF (NMP100 mL ⁻¹)	36	0	290	240	93	23	43	240	93	290	240	2400	4600	390	0	240	1255
pH ($\pm 0,01$)	5,35	5,48	4,10	4,02	3,90	5,81	4,22	6,63	6,38	6,75	6,34	7,10	5,92	6,66	5,76	5,63	1,09
PO ₄ ³⁻ -P (mgL ⁻¹)	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
NO ₃ ⁻ -N ($\pm 0,01$ mgL ⁻¹)	0,41	0,37	<0,09	<0,09	<0,09	0,35	0,44	0,66	0,40	0,34	0,33	0,23	0,44	0,24	0,52	0,39	0,12
Turbiedad ($\pm 0,01$ UNT)	6,90	7,30	1,00	0,70	0,20	9,60	0,50	8,30	10,80	11,50	6,00	14,50	1,40	31,50	0,51	7,38	8,18
TDS (± 8 mgL ⁻¹)	252	236	246	250	234	220	252	212	192	194	238	198	218	144	194	219	30
Dureza total CaCO ₃ (± 3 mgL ⁻¹)	23	23	21	21	21	23	23	23	21	23	28	21	24	14	27	22	3
HCO ₃ ⁻ (± 1 mgL ⁻¹)	76	75	73	75	75	75	82	70	64	62	84	53	68	31	70	69	13
Cl ⁻ ($\pm 0,1$ mgL ⁻¹)	12,9	12,2	11,2	11,6	11,5	12,6	11,6	12,4	8,1	13,7	11,1	15,1	8,5	5,1	8,2	11,1	2,6
SO ₄ ²⁻ (± 1 mgL ⁻¹)	92	92	95	98	106	83	107	66	67	49	82	34	49	14	41	72	29
Na ⁺ ($\pm 0,4$ mgL ⁻¹)	8,6	8,5	7,9	7,8	8,1	9,2	9,3	8,8	8,4	9,2	8,6	9,5	7,9	6,1	8,1	8,4	0,8
Ca ²⁺ ($\pm 0,5$ mgL ⁻¹)	21,4	21,1	20,9	21,6	21,6	20,6	23,6	18,7	17,3	15,9	22,3	12,7	17,3	7,0	17,4	18,6	4,3
Mg ²⁺ ($\pm 0,2$ mgL ⁻¹)	5,5	5,5	5,0	5,0	5,0	5,7	5,5	5,7	5,1	5,5	6,8	5,1	5,9	3,4	6,5	5,4	0,8
F ⁻ ($\pm 0,01$ mgL ⁻¹)	0,25	0,27	0,16	0,14	0,13	0,43	0,19	0,35	0,39	0,28	0,52	0,16	0,25	0,07	0,22	0,25	0,12
B ($\pm 0,07$ mgL ⁻¹)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
T amb ($\pm 0,5$ °C)	24,0	25,0	25,0	25,5	26,0	27,0	27,0	25,5	25,5	26,0	26,0	26,0	23,5	24,0	23,5	25,3	1,1
T H ₂ O ($\pm 0,1$ °C)	23,8	24,0	23,7	23,7	23,5	24,7	24,4	25,0	24,7	25,0	25,0	25,0	26,2	24,6	27,2	24,7	1,0
CE (± 1 μ Scm ⁻¹)	243	237	263	273	277	233	272	212	219	210	267	189	217	106	217	229	44
Caudal (m ³ s ⁻¹)	0,647	0,513	0,197	0,110	0,096	0,484	0,014	0,144	0,021	0,115	0,061	0,043	0,018	0,025	0,022	0,167	0,207

CF: se reporta la mediana; D.E.: desviación estándar

