

Monumento Nacional Guayabo: Calidad del Agua del Acueducto Precolombino

Guayabo National Monument: Pre- Columbian Aqueduct Water Quality

Yuliana Solís-Castro¹, Darner A. Mora-Alvarado²,
Ileana Garbanzo-Acosta³

Solís-Castro, Y; Mora-Alvarado, D; Garbanzo-Acosta, I. Mo-
numento Nacional Guayabo: Calidad del Agua del Acueducto
Precolombino. *Tecnología en Marcha*. Diciembre 2019. Vol
32 Especial. Laboratorio Nacional de Aguas. Pág 57-71.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4881>



- 1 Laboratorio Nacional de Aguas. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica. Correo electrónico: ysolis@aya.go.cr.
- 2 Director del Laboratorio Nacional de Aguas. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica. Correo electrónico: dmora@aya.go.cr.
- 3 Laboratorio Nacional de Aguas. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica. Correo electrónico: igarbanzo@aya.go.cr.

Palabras clave

Características fisicoquímicas y microbiológicas; naciente; muestreo.

Resumen

El presente estudio pionero, descriptivo-analítico, tiene como objetivo general realizar un acercamiento en el tiempo, para analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas en el agua de las diferentes etapas del acueducto precolombino, desde las fuentes, tanques y el desfogue, y su comparación con la calidad de las aguas de los acueductos que abastecen actualmente a la comunidad de Guayabo de Turrialba. La metodología, se enfocó en una inspección para identificar las etapas del sistema, luego se realizaron tres muestreos en seis puntos diferentes del acueducto y se efectuaron los respectivos análisis de laboratorio incluyendo: parámetros de campo, aniones, cationes, metales pesados y plaguicidas. Es difícil comprobar si los indígenas consumían agua con exactamente las mismas características fisicoquímicas detectadas, sin embargo, existe la posibilidad de que se asemejaran bastante. Los resultados indican que el agua del acueducto precolombino es de buena calidad y que posiblemente el deterioro de la estructura y la inadecuada captación que presentan las nacientes, provocó algunos valores altos en las concentraciones de aluminio y hierro. No obstante, la comparación con los acueductos de la ASADA de la comunidad colonial, demuestra que las aguas son del mismo acuífero y el agua es de calidad potable. Por último, se determinó que en el agua del acueducto precolombino no existe contaminación antropogénica y que el canal subterráneo del agua entre los dos tanques continúa trabajando adecuadamente, impidiendo infiltración de contaminantes. Se recomienda al Estado costarricense preservar el acueducto precolombino del Monumento Nacional Guayabo.

Keywords

Physicochemical and microbiological properties; spring water; sampling.

Abstract

The present study main goal is to analyze the physicochemical and microbiological water parameters throughout the different stages of the pre-columbian aqueduct, and therefore, compare the results with those of the water supply systems operated by the local ASADA. The methodology consisted of identifying the aqueduct stages, water sampling at six different points within the aqueduct, and analysing the laboratory tests including field parameters, anions, cations, heavy metals and pesticides. It is unknown whether the pre-columbian aqueduct supplied water to ancient natives with the same quality as today; however, there is a great chance the physicochemical characteristics remain alike. The results indicate the pre-columbian aqueduct carries good water quality, and the detected high concentrations of iron and aluminum are most likely due to decline in infrastructure and inappropriate source collection. According to the analysis, the water comes from the same aquifer in both the pre-columbian aqueduct and the local water supply systems, and it is considered potable. Finally, no anthropogenic pollution within the pre-columbian aqueduct water was found, and the aqueduct still works properly preventing entry of pollutants into the system. The study highlights the importance of preserving the pre-columbian aqueduct of the Guayabo National Monument by the Costa Rican government.

Introducción

Geográficamente la población precolombina, se divide en dos grupos: mesoamericano y sudamericano. En ambas zonas las culturas precolombinas construyeron grandes obras hidráulicas para el desarrollo agrícola y para contrarrestar las posibles sequías. Ejemplos hay muchos, como el caso de algunos cultivos en Perú con la cultura Pukara donde se construyeron tanques de almacenamiento y canales [1] o la cultura Nazca que construyó un sistema de acueductos subterráneos para abastecer la población. En Chile y en Perú, se encuentra evidencias de vestigios de pozos, mientras que en México en el sistema hidráulico de Edzná, se ubican colectores de agua, los cuales funcionan para evitar inundaciones [2]. Actualmente en Perú existen varios acueductos en funcionamiento elaborados por los Incas, entre ellos el acueducto de Machu Picchu, el de Ollantaytambo y Tipón el cual consta de avanzados sistemas de riego, fuentes para consumo humano y baños [3] (ver figura 1).



Figura 1. Acueducto Inca en Tipón, Perú.

En Costa Rica, a lo largo de unos 120 años, se iniciaron los estudios del sitio arqueológico Guayabo de Turrialba. Estas investigaciones, tanto nacionales como internacionales fueron aportados, en primera instancia por el hacendado de Cartago Jose Ramón Rojas Troyo y Hellmuth Polakowsky, naturalista alemán y miembro de la Sociedad Mexicana Geográfica de estadística [4]. Estos dos personajes fueron los que realizaron la intervención pionera en el “Cementerio Guayabo”, entre 1847 y 1917. Durante la primera mitad del siglo XX, ningún investigador se interesó en Guayabo, sobre todo, debido a que el dueño del sitio, Juan Gómez Alvarez, no permitió que el sitio fuera intervenido. Sin embargo, a partir de 1968, Carlos H. Aguilar, inició el proceso de varios estudios arqueológicos de la zona. Luego, otros especialistas continuaron con estos trabajos, principalmente mediante el trabajo comunal universitario de investigación social, de 1978 a 1988. Después de este periodo, se iniciaron las labores de restauración y conservación. Entre los rasgos arquitectónicos descubiertos se han encontrado 43 montículos, tres acueductos, dos plazas, dos calzadas y un encierro; todas las estructuras comunicadas entre sí por calzadas menores, puentes y gradas [5]. Las obras hidráulicas se agrupan en dos sistemas principales: el de abastecimiento de agua potable y drenajes para agua de lluvias en el cual las calzadas empedradas y la forma circular de los cimientos son

parte importante de este sistema. A la luz de estos descubrimientos en Guayabo, se promovió la creación del Monumento Nacional Guayabo (MNG), con el propósito de proteger y conservar uno de los recursos arqueológicos más importantes del país.

En razón de estos hallazgos y, aunque se han utilizado análisis fisicoquímicos como trazadores para evaluar el flujo de las aguas por parte de investigadores universitarios [6], ningún estudio ha analizado la calidad del agua de las fuentes de agua ni las diferentes etapas del acueducto, se presenta esta investigación pionera con el objetivo general de realizar un acercamiento en el tiempo, de las características fisicoquímicas y microbiológicas de las diferentes etapas del acueducto, desde las fuentes de agua hasta los tanques y el desfogue y, su respectiva comparación con la calidad de las aguas del acueducto vecino actual que abastece a la comunidad “colonial” de Guayabo.

Metodología

Para cumplir con el objetivo de este estudio descriptivo-analítico, de analizar la calidad de las aguas del acueducto del MNG y la comparación con el acueducto actual de la comunidad colonial de Guayabo, se aplicaron los siguientes pasos:

1. Análisis histórico del MNG: mediante el estudio de la literatura nacional e internacional, se abordaron diferentes estudios como el Plan General de Manejo del Monumento Nacional Guayabo del 2008, Geo-arqueología del Monumento Nacional Guayabo del 2011, Monumento Arqueológico Nacional Guayabo de Turrialba su historia, sus investigaciones, su manejo del 2012, Análisis de las Estructuras Hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo del 2014, entre otros.
2. Definición de los puntos de muestreo: la definición de los puntos de muestreo para la época seca, lluviosa y transición se efectuó mediante una inspección de las diferentes etapas del acueducto, en compañía del arqueólogo Rodolfo Tenorio, administrador del MNG.
3. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos: los análisis y el muestreo, se efectuaron siguiendo los criterios del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [7], además, los parámetros determinados se encuentran acreditados ante la norma INTE-ISO-IEC 17025:2005.
4. Evaluación de la calidad del agua: para la evaluación de la calidad del agua de las nacientes se utilizó los criterios de calidad de aguas de pozos y nacientes para potabilización en Costa Rica [8]. Por otro lado, la calidad del agua suministrada por la ASADA se evaluó con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable de Costa Rica [9].
5. Comparación de la calidad del agua del acueducto precolombino del MNG y el acueducto actual que abastece a la comunidad de Guayabo: efectuando muestreos e inspección en ambos acueductos permitió compararlos y sacar las respectivas conclusiones sobre la calidad del agua.

Análisis de resultados

En concordancia con el orden establecido en la metodología, a continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Análisis histórico del MNG: recurso natural y arqueológico

El Monumento Nacional Guayabo se encuentra ubicado a 19 kilómetros noroeste del cantón de Turrialba en la provincia de Cartago. Rodeado de paisaje rural, al sur del Monumento predominan las actividades agrícolas como el cultivo de café, mientras que al norte y al oeste

se realiza principalmente la ganadería. El clima de la región se caracteriza por no presentar una estación seca bien definida, en febrero y marzo la precipitación es más baja mientras que de junio a enero se presenta la mayor cantidad de lluvia [5].

Se ha asentado sobre depósitos volcánicos procedentes del Volcán Turrialba. Estos materiales volcánicos son lavas ricas en potasio, silicatos de magnesio y hierro y lahares, estos últimos tienden a ser impermeables o a filtrar el agua lentamente, lo cual dependiendo de la intensidad de lluvias puede provocar escorrentías superficiales o erosión en el sitio [10].

Es un área rica en generación de recurso hídrico y recarga acuífera. Es atravesado de noroeste a sureste por los ríos Guayabo y Lajitas. Además, dentro del monumento nacen las quebradas Yas y Rojas, las cuales son utilizadas para la producción agropecuaria [5]. Conjuntamente, el MNG protege fuentes de agua utilizadas para consumo humano que abastecen los acueductos de la ASADA de la Colonia de Guayabo.

Según las investigaciones hechas en el área, las estructuras arqueológicas estuvieron habitadas desde el año 1000 antes de Cristo, hasta 1400 después de Cristo, pero su mayor desarrollo se alcanzó cerca de los 800 años después de Cristo, época en que se construyeron las estructuras arqueológicas conservadas y protegidas más importantes de Costa Rica [11]. Tanto es así, que esta área arqueológica comprende de 15 a 20 hectáreas de elevado desarrollo y fue reconocido en el 2009 como Patrimonio Mundial de la ingeniería por la asociación americana de ingenieros civiles, ASCE (por sus siglas en inglés), esto debido a la complejidad en la ingeniería del mencionado acueducto, entre otros aspectos [12] [13].

En el MNG se ha encontrado petrograbados que tienen relación con las obras hidráulicas, pues se representan relieves, mapas, puntos de importancia en los asentamientos o el movimiento de las aguas, por ejemplo, se ha encontrado petrograbados con formas de espirales, los cuales, son el símbolo del agua [14].

Definición de los puntos de muestreo

El 2 de marzo del año 2017 se efectuó la inspección del acueducto precolombino en la cual se constató que gran parte de estas obras hidráulicas aún se encuentran funcionando. En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo de proceso del acueducto y numerados dentro de triángulos, del 1 al 6, los puntos de muestreo que se definieron. Además, para entender mejor las estructuras del acueducto se presenta una breve descripción de las mismas.

Nacientes

El acueducto precolombino está compuesto por dos nacientes. El agua de la naciente 1 es dirigida superficialmente por un desagüe hasta el tanque de sedimentación (T-101), no se observó alguna captación alrededor del afloramiento de la naciente. El agua de la naciente 2 se dirige superficialmente hasta un canal subterráneo (C-102). En esta naciente si fue posible observar piedras alrededor de ella, como si trataran de protegerla. En el cuadro 1, se muestra la georreferenciación de las nacientes.

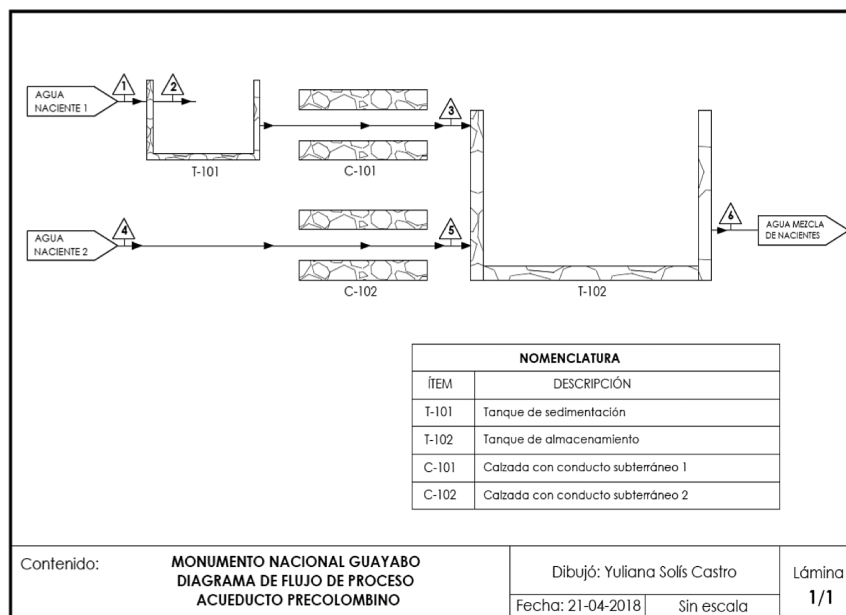


Figura 2. Diagrama de flujo de proceso del acueducto precolombino.

Cuadro 1. Nacientes del acueducto precolombino.

Estructura	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)
Naciente 1	E 533811	N 1102775	1097
Naciente 2	E 533862	N 1102844	1099

Tanque de sedimentación (T-101)

El tanque de sedimentación está hecho con rocas de diferentes dimensiones, posee una entrada de agua proveniente de la naciente 1 y una salida de agua hasta el canal subterráneo (C-101). Se presume que este tanque sirvió para disminuir la velocidad del flujo del agua, la cual viene montaña arriba y además para reducir la cantidad de sedimentos que transporta el agua [6]. En la figura 3 se muestra una imagen del tanque y en el cuadro 2 se presenta las dimensiones del mismo.

Canales subterráneos de conexión (C-101 y C-102)

El acueducto está compuesto por dos canales subterráneos. El primero conecta el tanque de sedimentación (T-101) con el tanque de almacenamiento (T-102) y el segundo conecta la naciente 2 con el tanque de almacenamiento (T-102). El fondo del canal, las paredes y la parte superior de los canales están construidos con rocas de diferentes tamaños que calzan perfectamente unas con otras, esto con el fin de impermeabilizarlos, para así evitar la contaminación del agua. Estos canales a la vez funcionaban como calzadas en la parte superior. En la figura 4 se muestra una calzada, la cual cubre el canal subterráneo C-101. En el cuadro 3 se presentan las dimensiones del canal subterráneo C-101. No se encontró las dimensiones exactas del canal C-102, pero poseen longitudes similares.



Figura 3. Tanque de sedimentación.

Cuadro 2. Dimensiones del tanque de sedimentación [6].

Díámetro promedio (m)	Profundidad promedio (m)
4,3	0,2



Figura 4. Calzada sobre el canal subterráneo C-101.

Cuadro 3. Dimensiones del canal subterráneo c-101 [6].

Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)
33,9	0,40	0,35

Tanque de almacenamiento (T-102)

El tanque de almacenamiento recibe agua de los dos canales subterráneos, posee un tiempo de retención bastante alto ya que sus dimensiones son considerables (ver cuadro 4), el agua sobrante desagua por otro canal subterráneo hasta la quebrada Lajitas. Al igual que el tanque de sedimentación, el tanque de almacenamiento está construido con rocas planas en el piso y las paredes (ver figura 5).

Según Rodolfo Tenorio, se cree que este tanque lo utilizaban nuestros antepasados para obtener agua para consumo (beber o cocinar), alrededor del tanque es posible observar metates de piedra circulares incrustados en la misma calzada, en los cuales posiblemente trituraban y preparaban los alimentos. También es posible diferenciar que el tanque posee tres paredes rectas y una pared escalonada hacia abajo a manera de gradas, la función de las mismas era facilitar el acceso de los pobladores al agua almacenada.



Figura 5. Tanque de almacenamiento T-102.

Cuadro 4. Dimensiones del tanque de almacenamiento T-102 [6].

Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)
9,3	3,5	0,91

Resultados fisicoquímicos y microbiológicos

En total se realizaron tres muestreos fisicoquímicos incluyendo: parámetros de campo, aniones, cationes, metales pesados y plaguicidas, así como tres muestreos microbiológicos para la determinación de coliformes fecales y E.coli. Tal como se mencionó anteriormente, la zona se caracteriza por no presentar una estación seca bien definida, generalmente los meses en que hay menos precipitaciones son febrero y marzo. Es por esto que los muestreos fisicoquímicos y microbiológicos se efectuaron el 2 de marzo del 2017 para representar la época seca, el 21 de junio 2017 para representar la época lluviosa y el 23 de enero del 2018 para representar la época de transición.

Resultados de análisis del MNG

Cuadro 5. Resultados de análisis para la naciente 1 y naciente 2 del acueducto precolombino.

Parámetro	Naciente 1			Naciente 2		
	AYA- ID-01912-17	AYA- ID-05951-17	AYA- ID-00301-18	AYA- ID-01913-17	AYA- ID-05952-17	AYA- ID-00302-18
	09/03/2017	21/06/2017	23/01/2018	09/03/2017	21/06/2017	23/01/2018
Alcalinidad (mg/L)	81	59	66	55	57	56
Aluminio (µg/L)	861,3	5,4	121,7	1222,4	274,2	74,4
Amonio (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Antimonio (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Arsénico (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cadmio (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio (mg/L)	20,1	12,2	14,9	10,9	11,2	10,7
Color Aparente (UPt-Co)	7	D.	D.	7	6	4
Conductividad (µS/ cm)	124	143	114	109	131	113
Cromo (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Dureza de Calcio (mg/L)	50	30	37	27	28	27
Dureza Total (mg/L)	74	53	57	48	49	46
Fluoruros (mg/L)	N.D.	N.D.	0,15	N.D.	N.D.	0,15
Fosfatos (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Hierro (µg/L)	154,0	N.D.	52,0	668,9	481,7	52,0
Magnesio (mg/L)	5,7	5,5	4,9	4,9	5,1	4,9
Manganeso (µg/L)	16,2	N.D.	3,2	52,9	32,4	3,2
Mercurio (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Níquel (µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Nitratos (mg/L)	N.D.	D.	D.	N.D.	N.D.	D.
Nitritos (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Olor	Acept.	Acept.	Acept.	Acept.	Acept.	Acept.
pH	6,98	6,76	6,32	6,84	6,69	6,32
Plomo (µg/L)	N.D.	0,6	D.	N.D.	D.	D.
Potasio (mg/L)	3,1	3,2	3,1	2,4	2,6	3,1
Sodio (mg/L)	6,5	6,4	5,6	6,3	5,5	5,6

Continúa...

Continuación						
Parámetro	Naciente 1			Naciente 2		
	AYA-ID-01912-17	AYA-ID-05951-17	AYA-ID-00301-18	AYA-ID-01913-17	AYA-ID-05952-17	AYA-ID-00302-18
	09/03/2017	21/06/2017	23/01/2018	09/03/2017	21/06/2017	23/01/2018
Sulfatos (mg/L)	3,76	3,87	3,62	3,25	3,19	3,62
Temperatura (°C)	18,9	19,5	19,2	20,0	19,8	19,2
Turbiedad (UNT)	2,86	1,45	0,48	1,19	2,91	0,48
Zinc (µg/L)	10,9	5,1	13,4	16,5	3,2	13,4
Col. fecales (UFC/100 mL)	1,0	Negativo	Negativo	Negativo	7,5	19,7
E.coli (UFC/100 mL)	1,0	Negativo	Negativo	Negativo	5,2	15,8

Cuadro 6. Calidad del agua en los seis puntos de muestreo del acueducto precolombino.

Parámetro	Naciente 1 hasta T-102			Naciente 2 hasta T-102		Mezcla de nacientes
	Punto de muestreo (PM)					
	1	2	3	4	5	6
Muestreo 1, 09/03/2017						
Conductividad (µS/cm)	124	122	114	109	109	112
pH	6,98	7,20	7,01	6,84	6,98	6,90
Temperatura (°C)	18,9	19,9	21,1	20,0	20,2	22,1
Turbiedad (UNT)	2,86	1,38	8,45	1,19	4,87	11,7
Col. fecales (UFC/100 mL)	1,0	8,6	6,3	Negativo	2,0	7,5
E.coli (UFC/100 mL)	1,0	7,5	5,2	Negativo	2,0	1,0
Muestreo 2, 21/06/2017						
Conductividad (µS/cm)	143	135	129	131	121	129
pH	6,76	6,90	6,83	6,69	6,86	6,91
Temperatura (°C)	19,5	19,9	19,6	19,8	20,4	19,8
Turbiedad (UNT)	1,45	1,60	2,88	2,91	5,53	3,32
Col. fecales (UFC/100 mL)	Negativo	2,0	2,0	7,5	29,9	11,0
E.coli (UFC/100 mL)	Negativo	1,0	2,0	5,2	16,1	8,6
Muestreo 3, 23/01/2018						
Conductividad (µS/cm)	114	110	109	113	*	106
pH	6,32	6,76	6,92	6,67	*	6,89
Temperatura (°C)	19,2	19,8	21,9	20,6	*	21,1
Turbiedad (UNT)	0,48	2,94	1,53	2,62	*	2,22
Col. fecales (UFC/100 mL)	Negativo	16,1	16,9	19,7	*	17,5
E.coli (UFC/100 mL)	Negativo	13,5	15,5	15,8	*	16,1
* No se muestreó porque el agua se mezclaba directamente con el agua del tanque.						

Resultados acueductos de la ASADA que abastecen actualmente la Colonia Guayabo

Cuadro 7. Resultados de análisis de los acueductos de Colonia Guayabo.

Parámetro	Acueducto sector centro		Acueducto sector este	
	Mezcla de nacientes 1 y 2	Red	Naciente 3	Red
	AYA-ID- 01653-17	AYA-ID-01654-17	AYA-ID-01655-17	AYA-ID-01656-17
Alcalinidad (mg/L)	66	-	64	-
Aluminio (µg/L)	N.D.	-	D.	-
Amonio (mg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Cadmio (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Calcio (mg/L)	12,9	-	12,7	-
Cloro residual libre (mg/L)	-	-	-	0,10
Cloruros (mg/L)	1,47	-	1,54	-
Cobre (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Color Aparente (UPt-Co)	D.	-	D.	-
Conductividad (µS/cm)	121	119	114	114
Cromo (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Dureza de Calcio (mg/L)	32	-	32	-
Dureza Total (mg/L)	56	-	55	-
Fluoruros (mg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Fosfatos (mg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Hierro (µg/L)	3,0	-	5,3	-
Magnesio (mg/L)	5,8	-	5,7	-
Manganeso (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Mercurio (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Níquel (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Nitratos (mg/L)	D.	-	D.	-
Nitritos (mg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Olor	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
pH	6,95	6,95	6,56	6,80
Plomo (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Potasio (mg/L)	3,3	-	2,9	-
Selenio (µg/L)	N.D.	-	N.D.	-
Sodio (mg/L)	6,4	-	6,0	-
Sulfatos (mg/L)	3,79	-	3,39	-
Temperatura (°C)	14,0	16,0	14,7	14,8
Turbiedad (UNT)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Zinc (µg/L)	23,3	-	17,2	-
Col. fecales (UFC/100 mL)	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
E.coli (UFC/100 mL)	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

Evaluación de la calidad del agua

En el cuadro 6, se mostró la calidad del agua de la naciente 1 hasta la entrada del tanque de almacenamiento T-102. Según los criterios microbiológicos, el agua de la naciente 1 en su sitio de afloramiento es de calidad buena para el muestreo 1 y de calidad excelente para los muestreos 2 y 3. El afloro de la naciente 1 se encuentra a aproximadamente 50 metros del tanque de sedimentación (T-101), el transporte del agua hasta este tanque se efectúa mediante un canal superficial, lo cual puede implicar más contaminación del agua. Esto se ejemplifica del punto de muestreo (PM) 1 al PM 2, en el cual se nota un aumento de la turbiedad de 0,48 unt a 2,94 unt (para el muestreo 3) y en los tres muestreos con un aumento en los coliformes fecales y E.coli, los cuales son indicadores de contaminación fecal y cuya presencia en el agua para consumo representa un alto riesgo para la salud, debido a que se asocian con una mayor probabilidad de encontrar patógenos.

Es por esto, que el proceso de clarificación que efectúa el tanque de sedimentación T-101, previo al tanque de almacenamiento (T-102), fue y es de suma importancia para obtener agua estéticamente más limpia y por lo tanto menos contaminantes. Del PM 2 al PM 3, teóricamente debería disminuir la contaminación; sin embargo, solo en el muestreo 3 es posible observar una pequeña disminución en la turbiedad. En los demás muestreos la conductividad, el ph, la turbiedad, los coliformes fecales y E.coli se mantuvieron prácticamente igual. Actualmente, el acueducto precolombino no se utiliza para consumo, por lo que la limpieza de los tanques no se efectúa con tanta frecuencia; pero se puede sospechar que en ese entonces los habitantes mantenían libre de lodos y limpio el tanque de sedimentación para que trabajara de manera óptima. Del PM 2 al PM 3, si bien no disminuye la contaminación, esta se mantiene constante, lo cual implica que el transporte subterráneo del agua entre los dos tanques continúa trabajando adecuadamente, impidiendo infiltración de contaminantes. En cuanto a la temperatura del agua, como era de esperarse, hubo un pequeño aumento de la misma conforme avanzaba el agua en el acueducto.

En el cuadro 6, se muestra la calidad del agua de la naciente 2 hasta la entrada del tanque de almacenamiento T-102. Según los criterios microbiológicos, el agua de la naciente 2 (PM 4) se clasifica como de calidad excelente para el muestreo 1 y de calidad buena para los muestreos 2 y 3. Del PM 4 al PM 5 el agua viaja aproximadamente 2 metros por un canal superficial y luego ingresa al canal subterráneo (C-102). Es posible que en ese paso por el canal superficial el agua se contamine y es por esto que se puede observar para el primer y segundo muestreo, un aumento en la turbiedad y en la densidad de coliformes fecales y E.coli. La naciente 2 se encuentra más cercana al tanque de almacenamiento, en comparación con la naciente 1. Al muestrear la naciente 2, fue posible observar rocas alrededor del sitio de afloramiento, se puede interpretar que en esa época existía alguna captación para la naciente que imposibilitara la contaminación del agua hasta el canal subterráneo, desmeritando la colocación de un tanque de sedimentación previo, como en el caso de la naciente 1.

Como se mencionó anteriormente, la función del tanque de almacenamiento era abastecer de agua para consumo a los pobladores. Por lo que teóricamente la mezcla de agua que ingresa al tanque sería el agua que consumían. En los tres muestreos efectuados, el tanque de almacenamiento se encontraba con acumulación de lodos y algas, ya que actualmente la limpieza no es frecuente como se pensaría que lo era en esos tiempos. Se podría decir que el muestreo más representativo fue el segundo, ya que los tanques habían sido limpiados un mes antes.

Parámetros fisicoquímicos en concentraciones elevadas: no se sabe a ciencia cierta si los indígenas consumían agua con exactamente las mismas características fisicoquímicas detectadas, sin embargo, existe la posibilidad de que se asemejara bastante. A las nacientes se

les realizó análisis completos de los niveles 1, 2 y 3 de acuerdo al Reglamento para la Calidad del Agua Potable [9]. Analizando por completo los resultados fisicoquímicos obtenidos, se obtuvieron concentraciones elevadas de aluminio y hierro mientras que los demás parámetros resultaron con concentraciones aceptables o bajas.

En el cuadro 5 se puede observar la concentración de aluminio en las nacientes para los tres muestreos. Para el primer muestreo, en la naciente 1 el aluminio dio una concentración de 861 $\mu\text{g/L}$ y en la naciente 2 una concentración de 1222,4 $\mu\text{g/L}$, para el segundo muestreo, la naciente 2 presentó un valor de 274,2 $\mu\text{g/L}$, estos valores están por encima del valor máximo admisible (VMA) que estipula el reglamento, el cual es 200 $\mu\text{g/L}$. Sin embargo, los demás resultados cumplen con el reglamento. Estas concentraciones de aluminio tienen mucho sentido, ya que la naciente actualmente no se encuentra bien captada y las concentraciones usualmente varían dependiendo de la estación del año y de la cantidad de lluvias que se presente. Mucho más llueva, más agua aflora en la naciente y por lo tanto más dilución tendrán los contaminantes, en este caso el aluminio. El muestreo 1 se efectuó en marzo, uno de los meses más secos, el muestreo 2 se realizó en junio, uno de los meses más lluviosos. Algunos autores han demostrado que existe relación entre los niveles promedio de aluminio en el agua potable y la incidencia de la enfermedad del Alzheimer [15]. No obstante, la Organización Mundial para la Salud (OMS) indica que existe poca evidencia de la toxicidad del aluminio mediante su ingesta oral y establecen un valor de referencia de riesgo para la salud del consumidor de 900 $\mu\text{g/L}$ [16].

Los resultados de la concentración de hierro en las nacientes se presentan en el cuadro 5. El VMA que establece el reglamento es de 300 $\mu\text{g/L}$, por lo que la naciente 1 cumple en los tres muestreos, sin embargo, la naciente 2 incumple en el primer y segundo muestreo, nuevamente esto va a variar dependiendo de las condiciones climatológicas siendo el valor más elevado (668,9 $\mu\text{g/L}$) el que se obtuvo en la época seca. El hierro es considerado por la OMS como un parámetro cuya presencia en el agua de consumo puede afectar la aceptabilidad de la misma por parte de los consumidores, pero que no representa un riesgo para la salud a las concentraciones normalmente encontradas en el agua de consumo [16]. Las fuentes subterráneas por lo general contienen Fe (II) (hierro ferroso), que expuesto al oxígeno del aire se oxida a Fe (III) (hierro férrico), otorgándole un color rojizo oscuro al agua y un sabor desagradable para quienes la consuman, usualmente esto ocurre a concentraciones mayores de 300 $\mu\text{g/L}$.

Generalmente, este tipo de contaminantes como el aluminio o el hierro se logran disminuir con una captación adecuada justo en el sitio de afloramiento, que impida el contacto con la tierra o la materia vegetal. Se ha demostrado el conocimiento tan elevado que tenían los indígenas costarricenses, por lo que quizá cubrían y protegían con piedras o lajas las nacientes hasta el ingreso en los canales subterráneos.

¿Existe contaminación antropogénica? En relación al entorno que posee actualmente el Monumento Nacional Guayabo, se quiso determinar si las actividades agrícolas y ganaderas que se desarrollan alrededor del Monumento han tenido algún impacto en la calidad del agua. Es por esto que se efectuó análisis de atrazina, bromacil, difenamida, etoprofos, prometrina y terbutrina (plaguicidas acreditados) en el tanque de sedimentación (T-101), obteniéndose resultados no detectables para todos los plaguicidas efectuados, con lo cual se confirma que no ha habido contaminación con estos plaguicidas en el acuífero que abastece la naciente 1.

Otros parámetros que podrían indicar contaminación antropogénica son los nitratos, nitritos y amonio, los cuales deben su origen por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, acumulación de abono y estiércol, mal manejo de las aguas residuales domésticas, incluida la falta de mantenimiento de tanques sépticos y descomposición de materia vegetal [17]. En los resultados efectuados a las nacientes y tanques del acueducto precolombino se obtuvieron

concentraciones no detectables para nitratos, nitritos y amonio, confirmando nuevamente la ausencia de contaminación antropogénica.

Comparación de la calidad del agua del acueducto precolombino del MNG y el acueducto actual que abastece a la comunidad de Guayabo

El 2 de marzo del 2017 se realizó un muestreo a los dos acueductos que abastecen la Colonia Guayabo. Las nacientes de la ASADA se encuentran dentro del área de protección del Monumento Nacional Guayabo y a su vez aproximadamente a 500 m de distancia de las nacientes del acueducto precolombino. La georreferenciación de la captación de las nacientes es la indicada en el cuadro 8.

Cuadro 8. Nacientes ASADA Colonia Guayabo de santa teresita.

Punto de Muestreo	Latitud	Longitud	Altitud
Mezcla de Nacientes 1 y 2	E 533514	N 1103000	1152 msnm
Naciente 3	E 533303	N 1102968	1177 msnm

Las nacientes de la ASADA se encuentran bien captadas y protegidas y los sistemas de abastecimiento en general se encontraban en buenas condiciones de operación y mantenimiento. Analizando los resultados fisicoquímicos y microbiológicos presentados anteriormente en el cuadro 7, para el sector este, el agua cumple los parámetros establecidos para aguas de consumo humano; el sistema es clorado, sin embargo, en la red de distribución se incumple con la concentración de cloro residual libre mínimo de 0,3 mg/L que establece el reglamento vigente. Para el sector centro, de igual manera existe un cumplimiento de los parámetros. Sin embargo, este sistema es no clorado.

Analizando la calidad fisicoquímica de las nacientes, se puede observar como esta es muy similar al agua del acueducto precolombino, cuando la conductividad y la alcalinidad de las aguas se asemejan, se puede considerar que se trata de agua del mismo acuífero. La gran diferencia entre el sistema actual y el sistema precolombino se basa en la captación de las nacientes, ya que el sistema actual impide la contaminación con aluminio, hierro y coliformes fecales.

Conclusiones y recomendaciones

- Según los criterios microbiológicos, el agua de la naciente 1 es de calidad buena para el muestreo 1 y de calidad excelente para los muestreos 2 y 3.
- Se constató que el canal superficial que transporta el agua de la naciente 1 hasta el tanque de sedimentación, conlleva a contaminación del agua.
- El proceso de clarificación que efectúa el tanque de sedimentación fue de suma importancia para obtener agua más limpia de contaminantes.
- Se demostró que el transporte subterráneo del agua entre los dos tanques continúa trabajando adecuadamente, impidiendo infiltración de agua o contaminantes.

- Según los criterios microbiológicos, el agua de la naciente 2 se clasifica como de calidad excelente para el muestreo 1 y de calidad buena para los muestreos 2 y 3.
- En las dos nacientes del acueducto precolombino se obtuvieron concentraciones elevadas de aluminio y en la naciente 2 de hierro, mientras que los demás parámetros resultaron con concentraciones aceptables o bajas.
- Según los parámetros evaluados, no existe contaminación antropogénica en el agua que abastece el acueducto precolombino.
- La calidad fisicoquímica del agua de los acueductos en cuestión es muy similar, por lo que se puede considerar que pertenecen al mismo acuífero.
- Las nacientes de la ASADA se encuentran bien captadas y protegidas, lo cual impide contaminación, así como sucedió con el acueducto precolombino.
- Debido a la importancia histórica y cultural, es fundamental que el Estado costarricense preserve el acueducto precolombino del MNG.

Referencias

- [1] E. Mujica, "Pukara: Una sociedad compleja temprana en la cuenca norte de Titicaca," *Los Incas y El Antiguo Perú: 3000 Años de Historia*, vol. 1, pp. 272-297, 1991.
- [2] J. E. Díaz Ortiz and B. Freire Delgado, "Manejo del recurso hídrico en culturas precolombinas," *EIDENAR*, no. 7, pp. 75-83, 2008.
- [3] E. Mujica, *Arqueología del Santuario Histórico Nacional y Sitio Patrimonio Mundial de Machu Picchu: estado de la cuestión y propuestas para un plan maestro*, Cusco: PNUD/UNESCO, 1993.
- [4] M. Murillo Herrera, *Monumento Arqueológico Nacional Guayabo de Turrialba. Su historia, sus investigaciones, su manejo*, San José: EUNED, 2012.
- [5] ACCVC-SINAC y Onca Natural, *Plan General de Manejo del Monumento Nacional Guayabo*, Cartago, 2008.
- [6] J. R. Bonilla Brenes, *Análisis de las Estructuras Hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo*, San José: Trabajo Final de Graduación, 2014.
- [7] American Public Health Association, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23 ed., Washington, 2017.
- [8] D. Mora, A. Mata and M. Sequeira, *Actualización de los criterios de calidad de aguas de pozos y nacientes para potabilización en Costa Rica 2012.*, Tres Ríos: LNA, 2012.
- [9] Decreto Ejecutivo N° 38924-S, *Reglamento para la Calidad del Agua Potable.*, San José: Diario Oficial La Gaceta, 2015.
- [10] G. Peraldo and L. G. Obando, "Geo-arqueología del Monumento Nacional Guayabo (MNG)," *Revista Geológica de América Central*, no. 44, pp. 119-130, 2011.
- [11] R. Tenorio Jiménez, *Monumento Nacional Guayabo, pasado precolombino de Costa Rica*, San José: Ministerio del Ambiente y Energía.
- [12] C. Carmona and G. Mora, "Monumento Guayabo Patrimonio Mundial de la Ingeniería," San José: *Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica*, no. 238, 2009.
- [13] UPADI, *Ingeniería: en el corazón del desarrollo*, San José, 2009.
- [14] G. Herrera Amighetti and A. C. Arias Quirós, "Los Petrograbados de Guayabo de Turrialba," *Revista Herencia*, vol. 29, no. 2, pp. 175-204, 2016.
- [15] R. Trejo and V. Hernández, "Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable," *Conciencia Tecnológica*, no. 25, 2004.
- [16] Organización Mundial de la Salud, *Guidelines for Drinking Water Quality. Fourth Edition*, Ginebra, 2011.
- [17] Laboratorio Nacional de Aguas, *Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica (IRCACH)*, Tres Ríos, 2017.