

Artículo Original

Caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas residuales en la ciudad de Chachapoyas, Región Amazonas

[Physicochemical and microbiological characterization of wastewater in the Chachapoyas city, Amazonas Region]

Jhesibel Chávez Ortiz, Dámaris Leiva Tafur, Fernando Corroto*

Proyecto SNIP N° 316401 Recursos Hídricos, Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES), Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM)

*e-mail de contacto: fernando.corroto@untrm.edu.pe

Resumen

Actualmente el agua es un recurso conflictivo ya sea para su consumo o por su contaminación, siendo este último uno de los principales problemas al que se enfrentan hoy en día las ciudades. En ese sentido el presente estudio buscó determinar la influencia de los efluentes residuales de la ciudad de Chachapoyas en la calidad del agua de la quebrada Santa Lucía y el río Sonche a través de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y el uso de índices como el de contaminación mineralógica (ICOMI). Se establecieron cinco puntos de muestreo, realizándose la colecta de muestras en los meses de agosto y diciembre del 2015. Los resultados fueron contrastados con los Estándares de Calidad Ambiental para aguas del Perú, y a partir de estos se obtuvo que los parámetros microbiológicos no cumplen con ninguna de las categorías analizadas. Además, el índice ICOMI, reflejó un mayor grado de contaminación en los dos puntos de muestreo de la quebrada Santa Lucía, seguido del punto ubicado en el río Sonche después de la afluencia de dicha quebrada. Finalmente, quedó evidenciado la influencia negativa que las aguas residuales de la ciudad de Chachapoyas tienen sobre la red hidrográfica adyacente, tanto directa como indirectamente, principalmente a nivel microbiológico, lo que queda reflejado en que en las estaciones de muestreo establecidas en el río Sonche, el punto que resultó con mayores concentraciones en relación a los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos fue el ubicado después de la confluencia con la quebrada Santa Lucía, para ambos meses.

Palabras clave: aguas tratadas; calidad del agua; ceja de selva; contaminación

Abstract

Currently water is a conflict resource either for consumption or pollution, being the last one of the main problems that cities face today. In this sense, the present study try to determine the influence of wastewater effluent from the city of Chachapoyas in the water quality of the Santa Lucía creek and Sonche river through physico-chemical, microbiological parameters and the use of indices such as the mineralogical pollution (ICOMI). Five sampling points were established, performing sample collection in the months of August and December 2015. The results were compared with the Environmental Quality Standards for waters of Peru, and from these was obtained that microbiological parameters do not meet none of the categories analyzed. In addition, the ICOMI index reflected a higher level of pollution in the two sampling points of the Santa Lucía creek, followed by Sonche point located on the river after the influx of this stream. Finally, it was demonstrated the negative influence that wastewater from the city of Chachapoyas have on the adjacent river system, both directly and indirectly, mainly in the microbiological level, which is reflected in that sampling stations established in the Sonche river, where the point that resulted with higher concentrations relative to the bacteriological and physico-chemical parameters was located after the confluence with the creek Santa Lucía, for the two sampling periods.

Keywords: sewage water quality; jungle; pollution

INTRODUCCIÓN

Sin lugar a dudas, la planificación de los recursos hídricos cada vez juega un papel más importante en el desarrollo económico y de las actividades humanas para lograr el desarrollo sostenible de las cuencas hidrográficas (Zhu *et al.*, 2011; Miao *et al.*, 2014). El vertimiento de aguas residuales de origen doméstico es uno de los impactos más importantes que se le atribuye al crecimiento urbano, y son los ecosistemas acuáticos los más afectados por estos impactos. La contaminación de los ríos debido a la incorporación de microorganismos, productos químicos y residuos industriales genera graves problemas de carácter ecológico, social y económico, los cuales van deteriorando la calidad del agua y disminuyendo su disponibilidad (González, 2008). Así, los tratamientos más comunes para este tipo de residuos son el depósito en vertederos sanitarios, la incineración y el compostaje (Korkakaki *et al.*, 2016).

Desde el punto de vista de la salud pública las aguas residuales son responsables del 80% de las defunciones en los países en vías de desarrollo. Esta situación se encuentra estrechamente relacionada con las bajas coberturas en el alcantarillado y el inadecuado tratamiento y disposición final de las aguas en estos países (OPS, 2002). Se estima que 1,1 millones de personas en todo el mundo, especialmente en las zonas rurales y las comunidades de bajos ingresos no tienen acceso al agua potable (WHO & UNICEF, 2000; Pérez-Vidal *et al.*, 2016). Asimismo son muchos los estudios que han demostrado que el agua es una fuente de diversas enfermedades infecciosas, siendo la enfermedad de transmisión hídrica más común en el mundo la diarrea (Clasen *et al.*, 2014). Esta enfermedad es la cuarta causa principal de muerte entre los niños menores de cinco años a nivel mundial (WHO, 2015). En la región del Caribe y América Latina, las enfermedades cuyo origen viene del consumo o del uso de agua suponen la segunda causa de muerte en niños menores de cinco años (OPS, 2011). Este es el caso de Colombia, las áreas rurales del país tienen los niveles más altos de riesgo para el suministro y tratamiento del agua (INS, 2013). En el Perú la infraestructura disponible en materia de alcantarillado tiene una cobertura efectiva del 57% de la población, y sólo el 20,62% de las aguas residuales urbanas son tratadas, de las

cuales el 6% ofrece un tratamiento aceptable, siendo la mayor parte de las aguas residuales vertidas en cuerpos de agua sin tratamiento alguno (ANA, 2015).

Entre los ríos de la sierra peruana con un alto grado de contaminación por vertimiento de aguas residuales, están la cuenca del Mantaro, los ríos San Juan, Huarón, Carhuacayán, Yauli y Azul colcha. Esto ocurre de igual manera en la selva, en los ríos Huallaga, Hualgayoc y Huancapetí. En la Costa, con estas características se ubican el río Rímac, Moche, Santa, Cañete, Pisco y Locumba (MINAM, 2015).

En nuestro país, el vertido directo de diversos contaminantes a los ríos se está convirtiendo en un grave problema, derivado principalmente de la descarga de aguas servidas, evidenciando su degradación a lo largo del cauce, principalmente en las estaciones de muestreo cercanas a los asentamientos poblacionales (Fernández, 2005).

La ciudad de Chachapoyas también se encuentra afectada por este problema, y es que el progresivo aumento de la población a lo largo de la última década ha generado el incremento de la descarga de efluentes residuales en la quebrada Santa Lucía, comprometiendo su calidad a través de la acción directa y puntual de las aguas residuales domésticas y municipales, que alteran sus características fisicoquímicas y microbiológicas. Frente a esta situación, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de los efluentes domésticos de la ciudad de Chachapoyas en la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua de la quebrada Santa Lucía y el río Sonche, empleando parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, para *a posteriori* contrastar los resultados con los Estándares de Calidad Ambiental para aguas (ECA's) de marcados por la legislación peruana.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende dos cuerpos de agua con radical importancia para la provincia de Chachapoyas, la quebrada Santa Lucía, localizada dentro de la zona urbana y receptora de los efluentes directos de aguas residuales municipales de la ciudad, y el río Sonche, río que recoge las aguas de la quebrada Santa Lucía (Figura 1).

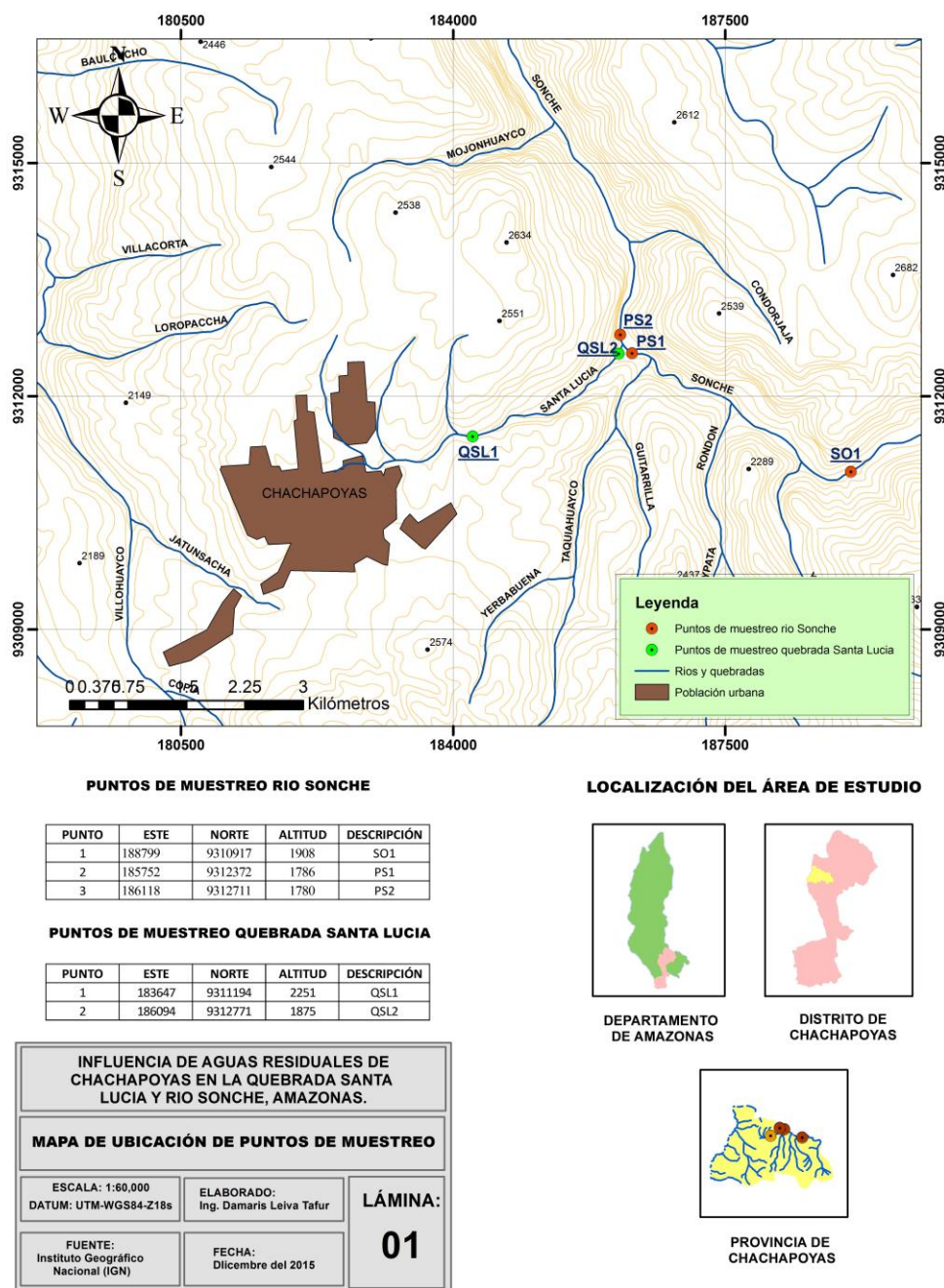


Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo en la quebrada Santa Lucía y el río Sonche, en las cercanías de la ciudad de Chachapoyas.

Ubicación y selección de las estaciones de muestreo

Se establecieron cinco estaciones de muestreo siguiendo la metodología marcada por Freshwater Ecology and Management para la evaluación del estado ecológico en ríos (Prat *et al.*, 2012), dos en la quebrada Santa Lucía (Tabla 1) y tres en el río Sonche (Tabla 2). Los requisitos seguidos a partir de la metodología mencionada fueron los siguientes:

Identificación de puntos de muestreo: El punto de muestreo fue identificado y reconocido de manera precisa, utilizando para determinar la ubicación exacta el Sistema de Posicionamiento Satelital (GPS). Este se registró en coordenadas UTM y en el sistema WGS84.

Accesibilidad: Se ubicó el punto de tal manera que el acceso hacia él fuera rápido y seguro.

Representatividad: La ubicación de los puntos de muestreo en el río Sonche se realizó teniendo en cuenta la convergencia de la quebrada Santa Lucía en su cauce; de la misma manera los puntos en la quebrada Santa Lucía

fueron ubicados teniendo en cuenta el vertimiento de los efluentes residuales.

De esta manera, y partiendo de los criterios antes descritos, los puntos de muestreo finales quedaron establecidos de la siguiente manera.

Estaciones de muestreo en la quebrada Santa Lucía:

Punto 1 (QSL1): Ubicado 100 metros después de la desembocadura de los efluentes residuales de la ciudad de Chachapoyas.

Punto 2 (QSL2): Ubicado 100 metros antes de su desembocadura en el río Sonche.

Estaciones de muestreo en el río Sonche:

Punto 3 (PS2): Ubicado 100 metros después de la desembocadura de la quebrada Santa Lucía.

Punto 4 (PS1): Ubicado 100 metros antes de la convergencia con la quebrada Santa Lucía.

Punto 5 (SO1): Se encuentra en el valle del río Sonche, ubicado tres kilómetros aguas arriba de su convergencia con la quebrada Santa Lucía.

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones de muestreo (EM) en la quebrada Santa Lucía

Estación	EM-1	EM-2
Código	QSL1	QSL2
Zona	18M	18M
Coordenadas UTM		
Este	183647	186094
Norte	9311194	9312771
Altitud	2251	1875

Tabla 2. Coordenadas de las estaciones de muestreo (EM) en el río Sonche

Estación	EM-3	EM-4	EM-5
Código	PS2	PS1	SO1
Zona	18M	18M	18M
Coordenadas UTM			
Este	186118	185752	188799
Norte	9312711	9312372	9310917
Altitud	1780	1786	1908

Toma de muestras

Para la toma de muestras se siguió el protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales, establecido por la Dirección General de Salud Ambiental del Perú (DIGESA, 2007).

Tiempo de muestreo

Los muestreos se realizaron el 30 de agosto (MM-1), y el 7 de diciembre (MM-2) del año 2015.

Métodos, técnicas e instrumentos

La concentración de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se determinó siguiendo los procedimientos APHA (2005).

La determinación de parámetros microbiológicos (P-MB) como coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF) y *Escherichia coli* (EC), se realizó con la técnica del Número Más Probable (NMP); así, las bacterias cultivables se obtuvieron a través de la técnica de fermentación en tubos múltiples con 10 diluciones y cinco réplicas por cada dilución (APHA, 2005). Para el grupo de coliformes totales se realizó la siembra en caldo Lauril Sulfato para su enriquecimiento, y la resiembra de los tubos positivos en caldo Brilla para su confirmación. Ambos fueron incubados a 37 °C ($\pm 0,5$), realizando conteos a las 24 y 48 horas; el grupo de coliformes fecales se determinó con la resiembra de los tubos positivos de caldo Lauril Sulfato a caldo EC, cuya incubación se realizó a 44,5°C por 48 horas. Para la determinación e identificación de colonias de *E. coli*, fueron sembrados por estría en el agar EMB los tubos que presentaron resultado positivo en caldo EC.

Para evaluar la influencia de las aguas residuales en la calidad microbiológica de la quebrada Santa Lucía y su influencia en el agua del río Sonche, se utilizaron los Estándares de Calidad Ambiental para aguas establecidos en el D.S 002-2008-MINAM de la legislación peruana, evaluando las categorías III ("Riego de vegetales y bebida de animales") y IV ("Conservación de ambientes acuáticos").

Los parámetros fisicoquímicos como Turbiedad (TB), temperatura (T°), pH, conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto (OD), fueron medidos en campo usando un equipo multiparamétrico SI Analytics; los demás parámetros fueron determinados en el laboratorio, para lo cual se recolectaron muestras de agua que fueron transportadas en

refrigeradores portátiles Wenco con gel pakcs de 250 gr para mantener la cadena de frío, y procesadas antes de las 24 horas.

Parámetros como alcalinidad (AL), cloruros (CL) y dureza total (DT) se realizaron por el método volumétrico. Por absorbancia se determinaron parámetros como nitratos (NO₃), fosfatos (PO₄), sulfatos (SO₄) y amonio (AM); además, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos totales en suspensión (STS) y sólidos totales disueltos (STD) se realizaron por diluciones y filtración al vacío. Para la realización de todos los análisis antes mencionados se siguió la metodología establecida por el APHA (2005).

Para evaluar la influencia de las aguas residuales en la calidad fisicoquímica de los cuerpos hídricos en estudio, se realizó la comparación de los resultados obtenidos con los límites establecidos en los ECAs, y a partir de los resultados de conductividad eléctrica, alcalinidad y dureza se determinó el ICOMI, cuyo valor definido en el rango de 0 a 1 refleja el grado de contaminación, donde los valores finales próximos a cero (0) reflejan muy baja contaminación por mineralización, mientras que los valores cercanos a uno (1) indican lo contrario (Ramírez *et al.*, 1997).

El Índice ICOMI se determinó con la siguiente fórmula:

$$\text{ICOMI} = 1/3 (I_{\text{Alcalinidad}} + I_{\text{Dureza}} + I_{\text{CE}})$$

Donde:

$$I_{\text{CE}}: 10^{(-3,26+1,34 \times \log \text{CE})}$$

$$I_{\text{Alcalinidad}}: -0,25+0,005 \times \text{Alcalinidad}$$

$$I_{\text{Dureza}}: 10^{(-9,09 + 4,4 \times \log \text{Dureza})}$$

Análisis de información

El análisis estadístico de datos se inició con la determinación de supuestos del modelo a través del test de normalidad con la prueba de Kolmogorov-Smirnov; igualmente se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas. Las pruebas estadísticas aplicadas fueron paramétricas ya que se cumplieron dichos supuestos del modelo. La prueba para una Vía de Clasificación (One Way AOV) permitió determinar la existencia de diferencias estadísticas significativas por puntos y mes de muestreo; para evaluar si los puntos de muestreo responden a distintos niveles de cada

parámetro analizado, por mes de muestreo, se recurrió a la prueba de ajuste de bondad de Chi - Cuadrado. Por último se realizó una correlación de Pearson para establecer el grado de asociación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Para todos estos análisis estadísticos fue usado el software estadístico Statistix versión 8.0.

RESULTADOS

Parámetros microbiológicos (MB) en las cinco estaciones de muestreo.

Se obtuvieron valores que van desde 3×10^7 a 9×10^{10} NMP de CT y CF/100 ml, y valores de 28×10^5 a 9×10^{10} NMP de EC/100 ml en la quebrada Santa Lucía. Complementariamente, para el río Sonche fueron obtenidos valores que van desde 5×10^2 a 9×10^5 de NMP de CT/100ml, de 5×10^2 a 5×10^5 NMP de CF/100ml, y de 5×10^2 a 24×10^4 NMP de EC/100ml (Tabla 3).

Parámetros fisicoquímicos (FQ) en las cinco estaciones de muestreo.

A partir de los análisis físicos realizados en campo y los análisis químicos determinados en el laboratorio, de las muestras de agua extraídas de los tres puntos de muestreo localizados en el río Sonche y los dos puntos de muestreo en la quebrada Santa Lucía, se obtuvieron los siguientes resultados para las dos temporadas de muestreo (Tablas 4).

Análisis de datos

De acuerdo a la prueba de ajuste de bondad de Chi - Cuadrado para evaluar la dependencia de los parámetros fisicoquímicos en relación a los puntos y meses de muestreo, se encontró que las únicas variables que presentan asociación son: amonio, dureza total y turbidez (Tabla 5). Para los parámetros microbiológicos, los puntos de muestreo respondieron de diferente

forma a los distintos niveles de coliformes totales, fecales y *E. Coli* en función de los meses de muestreo en estudio (Tabla 6).

Del análisis para una vía de clasificación de los parámetros fisicoquímicos, por punto y mes de muestreo, se observa que se existen diferencias estadísticas altamente significativas para todas las variables por puntos de muestreos, exceptuando las variables temperatura y pH (Tabla 6). Por el contrario, en cuanto al mes de muestreo, la única variable que presentó diferencias estadísticas altamente significativas fue el amonio.

Asimismo, los parámetros microbiológicos presentaron diferencias estadísticas altamente significativas solo por puntos de muestreo (Tabla 6).

Finalmente el índice de contaminación mineralógica muestra valores que van desde 0,211 hasta 0,664, siendo los puntos de muestreo con valores próximos a uno los ubicados en la quebrada Santa Lucía, y los valores cercanos a cero a las estaciones distribuidas en el río Sonche (Tabla 7).

Por otro lado, en las comparaciones realizadas entre los resultados obtenidos y los ECAs del agua, desde el punto de vista microbiológico ningún punto resultó ser apto para la categoría III de "Riego de vegetales y bebida de animales" para ninguna de las dos épocas de muestreo. A pesar que la estación SO1 cumplía con los estándares en relación a los CT y los CF, en el global de los parámetros microbiológicos resultó no ser apto para esta categoría debido a que el parámetro más exigente, que es EC, sobrepasaba los niveles permitidos.

Tabla 3. Parámetros microbiológicos obtenidos en las cinco estaciones de muestreo

Mes de Muestreo (MM)	P-MB (NMP/100 ml)	Estaciones de muestreo				
		QSL1	QSL2	P2S	P1S	SO1
MM-1	CT	9×10^{10}	5×10^7	9×10^5	35×10^3	3000
	CF	9×10^{10}	3×10^7	5×10^5	22×10^3	3000
	E.C	9×10^{10}	28×10^5	24×10^4	3200	3000
MM-2	CT	7×10^8	3×10^7	24×10^4	3000	500
	CF	7×10^8	3×10^7	24×10^4	3000	500
	EC	7×10^8	33×10^5	24×10^4	3000	500

Tabla 4. Resultados fisicoquímicos para los meses de agosto y diciembre de 2015

Parámetros FQ	Mes de agosto					Mes de diciembre				
	Estaciones de Muestreo					Estaciones de Muestreo				
	SO1	PS1	PS2	QSL1	QSL2	SO1	PS1	PS2	QSL1	QSL2
pH	8,49	8,35	8,47	7,935	8,366	8,47	8,42	8,27	8,06	8,49
T°	18,7	16,1	16,8	18,5	18,7	20,1	17,9	18,1	18,9	19,1
C.E.	193,3	186,4	188,7	761	557	182,4	185,5	192,7	902	708
Turbidez	19,82	47,78	180,41	1100	1100	33,28	34,25	62,21	1100	1100
O.D.	7,99	8,2	8,12	3,17	7,18	7,88	7,72	7,67	3,13	7,14
STD	111,84	113,22	115,98	456,6	334,2	109,44	111,3	115,62	546,4	424,8
Alcalinidad	53,36	56,26	59,45	210,25	141,81	60,03	61,77	67,91	237,84	169,65
Cloruros	10,1	13,66	18,91	131,35	39,93	8,41	11,56	16,81	148,16	56,74
Dureza total	40	41,6	52	72	80	44	42,4	46,4	32	40
Nitratos	1,48	2,82	4,76	47,53	21,32	0,34	2,62	3,62	41,9	15,69
fosfatos	0,17	0,31	1,1	2,72	2,09	0,22	1,01	1,51	3,4	2,77
Sulfatos	12,81	15,24	22,53	231,93	78,15	10,68	11,59	20,4	200,63	46,85
Amonio	0,03	236,81	301,88	43,98	438,31	0,01	12,76	58,8	14,78	147,35
DBO	10,37	6,49	4,57	92,04	54,44	2,19	1,41	0,62	71,45	33,85
STS	0,0135	0,028	0,04	0,395	0,266	0,0175	0,031	0,032	0,379	0,25

Tabla 5. Chi - Cuadrado para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Parámetros	VARIABLE	Chi ²	P-VALOR
Fisicoquímicos	AM	55,68	0,0000*
	AL	0,26	0,9921
	CE	8,80	0,0662
	CL	2,85	0,5827
	DBO	8,32	0,0806
	DT	10,09	0,0389*
	PO ₄	0,89	0,8275
	NO ₃	1,43	0,8395
	OD	0,07	0,9994
	pH	0,00	1,0000
	STD	5,24	0,2634
	STS	0,00	1,0000
	SO ₄	3,61	0,4616
	T°	0,30	0,9898
	TB	60,56	0,0000*
Microbiológicos	CT	1076,13	0,0000*
	CF	751,83	0,0000*
	EC	264,34	0,0000*

*Variables Dependientes

Tabla 6. Diferencias estadísticas extraídas entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Parámetros	FQ	EM	P	MM	P
		F		F	
Fisicoquímicos	AM	1,07	0,4585	5,93	0,0409*(1)
	AL	104	0,0001**(QSL1)	0,02	0,8793
	CE	43,6	0,0004** (QSL1)	0,09	0,7701
	CL	104	0,0001**(QSL1)	0,02	0,8793
	DBO	25,3	0,0016**(QSL1)	0,28	0,6126
	DT	98,7	0,0001**(QSL1)	0,06	0,8078
	PO ₄	18,1	0,0035**(QSL1)	0,44	0,5274
	NO ₃	98,7	0,0001**(QSL1)	0,06	0,8078
	OD	235	0,0000**(QSL1)	0,03	0,8691
	pH	2,40	0,810	1,78	0,2187
	STS	41,6	0,0005**(QSL1)	0,1	0,7648
	STS	943	0,0000**(QSL1)	0,00	0,9521
	SO ₄	76,4	0,0001**(QSL1)	0,07	0,805
	T°	0,41	0,795	2,47	0,1543
	TB	452	0,0000**(QSL1)	0,00	0,9493
Microbiológicos	CT	31,8	0,0009**(QSL1)	0,04	0,8496
	CF	60,8	0,0002**(QSL1)	0,03	0,8638
	EC	62,7	0,0002**(QSL1)	0,03	0,8653

*Significativo, **Altamente significativo, 1: mes de agosto, QSL1: Primer punto de la quebrada Santa Lucía

Los valores dentro del paréntesis expresan las mayores concentraciones de dichos parámetros.

Tabla 7. Índice de Contaminación Mineralógica (ICOMI).

MM	PM	I Alcalinidad	I Dureza	ICE	ICOMI
MM-1	QSL1	0,801	0,192	1	0,664
	QSL2	0,459	0,121	1	0,527
	PS2	0,047	0,029	0,636	0,237
	PS1	0,031	0,011	0,616	0,219
	SO1	0,017	0,009	0,606	0,211
	QSL1	0,939	0,009	1	0,649
MM-2	QSL2	0,598	0,003	1	0,534
	PS2	0,089	0,017	0,633	0,246
	PS1	0,059	0,014	0,632	0,235
	SO1	0,05	0,012	0,602	0,221

DISCUSIÓN

Los valores de las variables microbiológicas encontradas fueron similares e incluso algo superiores a los determinados por Cerdeña *et al.* (2014) en el puerto Masusa del río Itaya en Iquitos, indicando contaminación por desechos fecales y el vertido directo de aguas residuales, como ocurre en el puerto de la capital loreana. Los valores más altos en NMP de CT, CF y EC obtenidos en el río Sonche aparecen después de la desembocadura de la quebrada Santa Lucía en este, lo que confirma que la afluencia de la quebrada Santa Lucía, la cual baja con

una alta carga microbiana debido a la descarga continua de las aguas residuales de la ciudad de Chachapoyas, influye de forma importante sobre el contenido microbiano en el río Sonche. Esta misma situación se enfrenta en todos las partes del país; si nos trasladamos hacia la Amazonía Peruana, encontramos que la mayor parte de los ríos se encuentran impactados por los vertimientos de origen agrícola, industrial y urbano (IIAP, 2004). De este modo, este río experimentó un incremento de 3×10^3 de EC/100ml a 24×10^4 NMP para el mes de agosto desde la estación SO1 (río Sonche situado 100

metros antes de la unión con la quebrada Santa Lucía) hasta el punto PS2 (el punto ubicado en el río Sonche 100 metros después de su unión con la quebrada Santa Lucía). Esta tendencia a partir de la cual un curso de agua con una carga microbiana alta influye en el aumento de esta misma carga microbiana en un curso de agua receptor, como en este caso es el río Sonche, se repite en diversos estudios (Song *et al.*, 2006; Bhat y Darnet, 2012).

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación por lo que a mayor concentración de estos, aumenta la probabilidad de que contengan diversos microorganismos patógenos (Herrera, 2000; Claret *et al.*, 2005).

Al realizar la comparación de los parámetros microbiológicos por meses de muestreo se obtuvo que la mayor concentración de estos sucedió en el mes de agosto; esta diferencia fue estadísticamente imperceptible, pero numéricamente sí se observó una diferencia, la cual puede deberse a que en los dos meses anteriores al segundo muestreo se dieron algunos días lluviosos, con lo que la precipitación ocasionó una mayor dilución de CT, CF y EC, ocasionando una ligera disminución de estos parámetros para el mes de diciembre. Si bien las precipitaciones generan arrastre de suelo y otros materiales que pueden contener importante carga microbiana e incrementar los niveles de microorganismos en el agua. En este caso la precipitación actuó como un agente de dilución ya que estas no se presentaron de forma constante durante el muestreo, hecho que se sustenta con el estudio realizado por Cabrera *et al.*, (2008) en el estado de Yucatán (México). Por el contrario los climas fríos, lluviosos y con pequeña insolación permiten una prolongada supervivencia de las bacterias exógenas al proporcionar un medio activo y poco agresivo (Moreno *et al.*, 1998). Cabe destacar que, a lo anteriormente expuesto, se suma que las aguas residuales no solo vienen cargadas de material microbiano, sino también de otros componentes como los detergentes, compuestos no biodegradables, o sales minerales, que impiden la proliferación de un alto contenido de bacterias, por lo que estas tienden a disminuir (Rivera *et al.*, 2009).

Además otra posible explicación de por qué no se obtuvieron variaciones importantes de CT, CF y EC por meses de muestreo puede ser

debido a que, según González (2012), cada ser humano excreta de 100 000 a 400 000 millones de CF por día, lo que explica el porqué de las concentraciones elevadas de estos parámetros en el agua. Por tanto, al ser este vertimiento constante y continuo en el tiempo, es lógico que las concentraciones de estos microorganismos, tanto en la quebrada Santa Lucía como en el río Sonche, no presenten una variabilidad amplia o significativa con respecto a los períodos de muestreo, situación similar a la acontecida en Sánchez *et al.* (2014) al evaluar la calidad sanitaria del agua de reservorios acuíferos de Corrales de San Luis Beltrán, en Colombia.

Para el mes de diciembre, dos puntos resultaron aptos para la categoría IV, SO1 y PS1; estos mantuvieron sus valores por debajo de lo exigido por los ECA's, lo que se explica en base a que estos puntos se encuentran ubicados antes de la unión de la quebrada de Santa Lucía al río Sonche, y al no recibir la carga microbiana presente en esta, no están fuertemente impactados, lo que se correlaciona con lo estudiado por Romeu *et al.* (2012) en el río Luyanó en la Habana, donde se concluye que los puntos más impactados son aquellos que tienen vertimiento directo de origen doméstico y su consecuente alta carga contaminante microbiana.

A partir de los parámetros fisicoquímicos se observa que en el mes de agosto se presentaron valores más elevados en el río Sonche, especialmente en el tercer punto (PS2), que se vio influenciado por la confluencia de la quebrada Santa Lucía; Chalarca *et al.*, (2007), reporta que en la ciénaga de Ayapel en Córdoba (Argentina), el impacto de los efluentes domésticos es mayor en la época de estiaje debido a que las fuentes de agua no tienen la capacidad de amortiguar las descargas provenientes de la actividad antrópica.

Los valores más elevados, tanto en los parámetros fisicoquímicos como en los microbiológicos, se registraron en el primer punto de muestreo (QSL1) de la quebrada Santa Lucía debido a la cercanía de dicho punto con los focos contaminadores de la propia quebrada (Saunders *et al.*, 2012); contrariamente, los valores más bajos se dieron en el punto 5 (SO1) del río Sonche. Por otro lado, los valores intermedios se presentaron en el punto 3 (PS2) y 4 (PS1), con

una diferencia entre estos dos últimos puntos, y es que si bien el punto 3 (PS2) se ve influenciado por la descarga proveniente de la quebrada, el factor que realmente interviene en dicha diferencia es el caudal, y este, sumado a la intensidad de corriente, facilitan la dilución de los agentes contaminantes evitando que esta diferencia sea notoria y estadísticamente perceptible (Cabrera *et al.*, 2008).

Con respecto al cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental para aguas en relación a los parámetros fisicoquímicos, en la Categoría III de "Riego de vegetales y bebida para animales", los puntos de muestreo SO1 y PS1 la cumplen al 100%, sin embargo para el punto PS2 los valores de fosfatos superan los límites establecidos en el ECA pues el exceso de fosfatos en el agua respecto al riego de vegetales traería consecuencias relacionadas con la interferencia en el vegetal para poder asimilar otros nutrientes, por lo que se considera como un limitante para el crecimiento de las plantas (Whang *et al.*, 2011). Además, si el destino de uso del agua es la bebida de animales, los tres puntos establecidos cumplen con los ECAs, y es que para esta subcategoría los valores son menos exigentes y flexibles. Respecto a la Categoría IV "Conservación de ambientes acuáticos", solo el primer punto (SO1) entra dentro de los límites establecidos en los ECAs con respecto a los parámetros que se determinaron, mientras que el punto PS1 presenta valores elevados de amonio debido a las heces que trasporta el agua residual de la quebrada Santa Lucía; estos valores se comportan de manera normal ya que el amonio se encuentra íntimamente relacionado con descargas recientes de desagües (Barrenechea, 2008). Este mismo hecho sucede en el punto PS2, que además del amonio presenta niveles de fosfatos fuera de los límites, niveles que suelen estar provocados por los detergentes vertidos (Pütz, 2008). La quebrada Santa Lucía, en ninguno de los dos puntos de muestreo establecidos, cumple con los estándares de calidad para las dos categorías antes citadas, ya que más del 50% de los parámetros determinados superan los valores establecidos en los ECAs (MINAM, 2008). En cuanto al Índice de Contaminación Mineralógica (ICOMI) determinado a partir de la dureza, alcalinidad y conductividad eléctrica, cabe destacar que la elección de estos parámetros en el desarrollo de este índice es

debido a la importancia ecológica que desempeñan y porque en sí mismas conjugan de forma simultánea el papel de distintas variables analizadas en la presente investigación (Ramírez *et al.*, 1997); en este sentido, se puede explicar que los puntos de muestreos establecidos en la quebrada Santa Lucía, para ambos meses de muestreo, exhiben valores cercanos a uno, lo que significa que son los puntos con mayor nivel de contaminación mineralógica (Santos *et al.*, 2003). Para el río Sonche, los valores del ICOMI se aproximan a cero, siendo el punto 5 (SO1) el más cercano, lo que indica que es el punto menos contaminado. Las razones que sustentan los resultados anteriores van en la línea de que este punto no se encuentra impactado por las aguas residuales, pero a medida en que descendemos en el río, los valores en los puntos 4 (PS1) y 3 (PS2), estos valores se distancian del cero, reflejando mayor nivel de contaminación (Romeu *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES

Las concentraciones más altas de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se obtuvieron en la quebrada Santa Lucía, debido al aporte directo de las aguas residuales de la ciudad de Chachapoyas en esta quebrada de forma directa, y en el río Sonche indirectamente.

La evaluación de los parámetros microbiológicos conjuntamente con los fisicoquímicos en las estaciones de muestreo seleccionadas de la quebrada Santa Lucía y el río Sonche, permitió saber la influencia de las aguas residuales de la ciudad de Chachapoyas en ambos cuerpos receptores, evidenciando un fuerte impacto en la calidad del agua del río Sonche, debido al incremento de estos indicadores de contaminación a medida que la quebrada Santa Lucía desaguaba en este.

De acuerdo a los ECA's ninguna estación de muestreo resultó ser apta para la categoría III de "Riego de vegetales y bebida de animales", bajo la óptica del análisis microbiológico, por lo que estas restricciones de uso desprenden la urgente necesidad de una intervención inmediata para mitigar el impacto y lograr su posterior restauración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2015) Protección del agua, vigilancia y control de vertimientos. Lima: Ministerio de Agricultura.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Work Association) y WPCF (Water Pollution Control Federation). (2005) Standard methods for examination water and wastewater. Washington: APHA.
- Barrenechea, A. (2008) Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. *Manual I, Teoría*, 1, 2-55.
- Bhat, S. y Danek, L. J. (2012) Comparison of fecal coliform before and after wastewater treatment facility: a case study near a coastal town in the Southeastern USA. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223 (5), 1923-1930.
- Cabrera, A., Pacheco, J. y Coronado, V. (2008) Presencia de organismos coliformes fecales en el agua subterránea de una granja porcícola en el Estado de Yucatán. *Revista académica de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán* [en línea] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico11/as-13.pdf> [Consulta: 06 noviembre 2016].
- Cerdeña, C., Reyes, W. y Vásquez, A. (2014) Contaminación de las aguas del río Itaya por las actividades portuarias en el Puerto Masusa, Iquitos, Perú. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 4 (1), 100-105.
- Chalarca, D., Ruíz, R. y Ramírez, N. (2007) Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 40, 41-58.
- Claret, M., Okuda, Y. y Pérez, C. (2005). Estudio espacio temporal de la contaminación por coliformes fecales en agua de pozos noria del secano interior, VII Región Chile. VII Región, Quilamapu: INIA.
- Clasen, T., Boisson, S., Routray, P., Torondel, B., Bell, M., Cumming, O., Ensink, J., Freeman, M., Jenkins, M., Odagiri, M., Ray, S., Sinha, A., Suar, M., y Schmidt, W.P. (2014) Effectiveness of a rural sanitation programme on diarrhoea, soiltransmitted helminth infection, and child malnutrition in Odisha, India: a cluster-randomised trial. *The Lancet Global Health*, 2 (11), doi: 10.1016/S2214-109X(14)70326-2
- DIGESA. (2007). Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales. Lima: DIGESA.
- Fernández, I. (2005) Contaminación del río Chili, en Arequipa, durante los años 1972 a 1982 y 1999 a 2004. *Ciencia y Desarrollo*, 7, 61-75.
- González, M. (2008) Evaluación de la calidad microbiológica de las aguas del río Cruces, desde Loncoche hasta San José de la Mariquina. Tesis de grado, Facultad de Ciencias veterinarias, Universidad Austral de Chile.
- González, G. (2012) *Microbiología del agua, conceptos y aplicaciones*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Herrera, L. (2000) *Fundamentos Microbiológicos de la ingeniería ambiental*. Santiago: Universidad de Chile.
- Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP). (2004) *Contaminación ambiental en la Amazonía Peruana*. Iquitos: IIAP.
- Instituto Nacional de Salud (INS). (2013) Monitoring of drinking water quality in Colombia (Estado de la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en Colombia). SIVICAP, Bogotá (Colombia), [en línea] Disponible en: [https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/Informe%20Vigilancia%20Calidad%20Agua%20a%C3%B1o%202012\[1\].pdf](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/Informe%20Vigilancia%20Calidad%20Agua%20a%C3%B1o%202012[1].pdf) [Consulta: 03 febrero 2016].
- Korkakaki, E., Mulders, M., Veeken, A., Rozendal, R., van Loosdrecht, M. C., y Kleerebezem, R. (2016) PHA production from the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Overcoming the inhibitory matrix. *Water research*, 96, 74-83.
- Miao, D.Y., Li, Y.P., Huang, G.H., Yang, Z.F., y Li, C.H. (2014) Optimization model for planning regional water resource systems under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140 (2), 238-249.
- MINAM. (2008) D.S N° 002. Estándares de calidad ambiental para aguas. Lima, Perú: MINAM.

- MINAM. (2015) La situación del agua en el Perú. Lima, Perú: MINAM.
- Moreno, L., Navarrete, P., y Virgós, L. (1998) *Conceptos básicos de microbiología de las aguas subterráneas*. Madrid: Instituto tecnológico geominero de España.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2002). Eliminación de microorganismos por diversos procesos de tratamiento. CEPIS.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2011). *Agua y Saneamiento: evidencias para políticas públicas con enfoque en derechos humanos y resultados en salud pública*. OPS, Washington [en línea] Disponible en: http://www.paho.org/tierra/images/pdf/agua_y_saneamiento_web.pdf [Consulta: 03 febrero 2016].
- Pérez-Vidal, A., Díaz-Gómez, J., Castellanos-Rozo, J., y Usaquen-Perilla, O.L. (2016) Long-term evaluation of the performance of four point-of-use water filters. *Water research*, 98, 176-182.
- Prat, N., Rieradevall, M., y Fortuño, P. (2012) *Metodología F.E.M. para la evaluación del estado ecológico de los ríos mediterráneos*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Ramírez, A., Restrepo, R., y Viña, G. (1997) Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *Ciencia, tecnología y futuro*, 1 (3), 135-153.
- Rivera, N., Encina, F., Palma, R., y Mejías, P. (2009) La calidad de las aguas en el curso superior y medio del río Traiguén. IX Región-Chile. *Información tecnológica*, 20 (4), 75-84.
- Romeu, B., Larrea-Murrell, J., Lugo-Moya, D., Rojas-Hernández, N., y Heydrich-Pérez, M. (2012) Calidad microbiológica de las aguas del río Luyanó, La Habana, Cuba. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 43 (3) [en línea] Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/1812/181226874006.pdf> [Consulta: 15 enero 2016].
- Sánchez, Á., Arboleda, J., Rivera, H. y Valle, R. (2014) Análisis de coliformes y bacterias reductoras de sulfato en reservorios acuíferos de Corrales de San Luis Beltrán, Atlántico, Colombia. *Medicina y laboratorio*, 20, 9-10.
- Santos, E.C., Jesus, I.M.D., Brabo, E.D.S., Fayal, K.F., Sá Filho, G.C., Lima, M. D. O. y Câmara, V. D. M. (2003) Exposição ao mercúrio e ao arsênio em Estados da Amazônia: síntese dos estudos do Instituto Evandro Chagas/FUNASA. *Revista brasileira de epidemiologia*, 6 (2), 171-185.
- Saunders, O., Harrison, J., Fortuna, A. M., Whitefield, E., y Bary, A. (2012) Effect of anaerobic digestion and application method on the presence and survivability of E. coli and fecal coliforms in dairy waste applied to soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223 (3), 1055-1063.
- Song, Z., Zheng, Z., Li, J., Sun, X., Han, X., Wang, W., et al. (2006) Seasonal and annual performance of a full-scale constructed wetland system for sewage treatment in China. *Ecological Engineering*, 26, 272-282.
- Wang, J.J., Zhang, H., Schroder, J.L., Udeigwe, T. K., Zhang, Z., Dodla, S.K., y Stietiya, M.H. (2011) Reducing potential leaching of phosphorus, heavy metals, and fecal coliform from animal wastes using bauxite residues. *Water, Air, & Soil Pollution*, 214 (1-4), 241-252.
- World Health Organization (WHO), United Nations Children's Fund (UNICEF). (2000) *Global Water Supply and Sanitation Assessment Report*. Geneva [en línea] Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/Globassessintro.pdf [Consulta: 10 marzo 2016].
- World Health Organization (WHO). (2015). *World Health Statistics 2015*. WHO, Luxembourg [en línea] Disponible en: http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2015/en/ [Consulta: 03 febrero 2016].
- Zhu, Y., Huang, G.H., Li, Y.P., He, L., y Zhang, X. X. (2011) An interval full-infinite mixed integer programming method for planning municipal energy systems—A case study of Beijing. *Applied Energy*, 88 (8), 2846-2862.