



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO Y APROVECHAMIENTO
DE AGUAS TERMOMINERALES POST-USO DEL MUNICIPIO
DE PAIPA (BOYACÁ)**

Juan Carlos Díaz López

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental, Especialización en Manejo y
Gestión del Agua

Medellín, Colombia

2020



Alternativas para el manejo y aprovechamiento de aguas termominerales post-uso del
municipio de Paipa (Boyacá)

Juan Carlos Díaz López

Trabajo de monografía presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Manejo y Gestión del Agua

Asesor (a):
Darío Naranjo Fernández

Línea de Investigación:
Gestión del Recurso Hídrico y Manejo del Agua

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental, Especialización en Manejo y Gestión del Agua
Medellín, Colombia
2020

ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS TERMOMINERALES POST-USO DEL MUNICIPIO DE PAIPA (BOYACÁ)

Resumen: El estudio presenta una recopilación de diversas alternativas para el manejo y aprovechamiento de las aguas termominerales provenientes de diversos hoteles y balnearios del municipio de Paipa (Boyacá), las cuales son vertidas a dos sistemas denominados dársenas cuya función es almacenar este tipo de aguas una vez han llegado a temperaturas inferiores a 25 °C, para posteriormente ser vertidas al río Chicamocha.

Para el desarrollo del estudio se evalúan parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en cuatro puntos monitoreados distribuidos a lo largo de los sistemas dársena, evaluando las características del agua que ingresa desde la dársena 1 hasta el vertimiento final al río Chicamocha, tales como pH, oxígeno disuelto, conductividad, temperatura, nutrientes, demanda química y biológica de oxígeno, así como coliformes totales y fecales. De esta manera, se realiza un análisis del impacto que puede generar el vertimiento de este tipo de aguas sobre la fuente receptora mediante la aplicación de diferentes índices de calidad, los cuales determinan el potencial contaminante de las aguas termominerales del municipio de Paipa.

Se realiza una recopilación de información referente a los diversos procesos que pueden ser aplicables para el tratamiento y aprovechamiento de las aguas termominerales objeto de estudio; métodos que usan la aplicación de la radiación solar, el uso de reactivos químicos para disminuir las altas concentraciones de sales así como tratamientos con estrategias combinadas que emplean el consumo de la electricidad para hidrolizar el agua, el cambio de temperaturas y presiones que separan los iones salobres, generando subproductos que dependiendo del uso, podrían ser aprovechados en estrategias de comercialización.

Palabras clave: Aguas termominerales, uso y aprovechamiento de aguas termominerales, aguas salinas, aguas termales, tratamiento de aguas.

1. INTRODUCCIÓN

Paipa se ha caracterizado por ser un municipio en el que una de sus principales fuentes económicas es el turismo generado por las artesanías, el paisajismo y el aprovechamiento de recursos termominerales como consecuencia de la actividad volcánica pasiva ubicada en la zona que corresponde a la cuenca de la quebrada Honda-río Salitre, y en donde se localizan algunos afloramientos de este tipo de aguas que constituyen uno de sus atractivos y pilares económicos. Diversos hoteles, balnearios y piscinas se benefician del recurso subterráneo de la zona, extrayéndolo para fines recreativos.

En Paipa existen dos sistemas de almacenamiento de aguas termominerales derivadas de la actividad turística denominadas dársenas, estructuras construidas con el fin de regular el volumen de aguas vertido al río Chicamocha que genera la industria hotelera. Luego de alcanzar su volumen máximo de almacenamiento, las aguas de las dársenas son vertidas al río Chicamocha por una entidad que regula su operación (Uso Chicamocha).

Luego de su ciclo de uso, las aguas termominerales almacenadas en las dársenas son vertidas sin ningún tipo de tratamiento al río Chicamocha, siendo éste una fuente hídrica de diversos usos, uno de ellos es el uso para riego gestionado por Uso Chicamocha, entidad que provee del recurso al sector agrícola. Debido a la composición fisicoquímica de las aguas termominerales en Paipa, se realiza una identificación de los impactos ambientales que estas aguas pueden generar empleando una lista de chequeo e indicadores de calidad de agua, los cuales, mediante las características físicas, químicas y microbiológicas, determinan el potencial que tienen las aguas termominerales para afectar los sistemas naturales donde son vertidas debido a que puede aumentar la conductividad, generar cambios de temperatura disminuyendo el oxígeno disuelto, originando olores y aportando sales, generando un impacto socio-ambiental en el río Chicamocha.

Mediante una revisión bibliográfica, se realiza una recopilación de seis (6) sistemas de tratamiento, realizando una descripción de estos y analizando su viabilidad para tratar las aguas termominerales del municipio, tomando como parámetros clave las altas concentraciones de minerales disueltos como sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-), hierro II (Fe^{2+}), entre otros. Finalmente, el trabajo de investigación permite identificar posibles alternativas para manejar y aprovechar las aguas termominerales del municipio de Paipa, mitigando los impactos que generan las aguas sobre el río Chicamocha.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Revisar las alternativas de manejo y aprovechamiento de las aguas termominerales post-uso del municipio de Paipa (Boyacá).

2.2. Objetivos específicos

- Analizar los impactos ambientales negativos en el recurso hídrico generados por el manejo y aprovechamiento actual de las aguas termominerales post-uso del municipio de Paipa (Boyacá).
- Evaluar las alternativas de manejo y aprovechamiento de acuerdo con las particularidades de las aguas termominerales post-uso generadas en el municipio de Paipa (Boyacá).
- Describir los criterios a considerar para el diseño de las estructuras de tratamiento idóneas, de acuerdo a las alternativas de manejo y aprovechamiento afín con las particularidades de las aguas termominerales post-uso del municipio de Paipa (Boyacá).

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el presente estudio se realizó mediante la búsqueda y compilación en bases de datos donde se identificó información referente a los impactos ambientales negativos en el recurso hídrico generados por las aguas termominerales post-uso como las del municipio de Paipa (Boyacá), las características, alternativas de uso y tratamiento para este tipo de aguas.

Los impactos ambientales se determinaron mediante la metodología de listas de chequeo, analizando registros fotográficos y el uso de cinco (5) índices de calidad de agua: índice de calidad por materia orgánica (ICOMO), índice de calidad por sólidos suspendidos (ICOSUS), índice de contaminación trófico (ICOTRO), índice de contaminación por mineralización (ICOMI) e índice de contaminación para uso agrícola (DINIUS); estos índices se evaluaron tomando como referencia la caracterización fisicoquímica de las aguas termominerales; posteriormente, se realizó una descripción de las alternativas de manejo y aprovechamiento encontradas.

Una vez evaluadas las alternativas de manejo y aprovechamiento, se determinó la alternativa de uso y tratamiento que se ajusta a las aguas termominerales post-uso del municipio y se describieron los criterios a considerar para el diseño de las estructuras de tratamiento idóneas, de acuerdo con las alternativas de manejo y aprovechamiento afín con las particularidades de las aguas termominerales post-uso del municipio.

4. LAS AGUAS TERMOMINERALES EN EL MUNICIPIO DE PAIPA

En el presente numeral se describen las características del área de estudio, los términos y conocimientos necesarios para una mejor comprensión de la terminología empleada. El proyecto en cuestión se localiza en el departamento de Boyacá, municipio de Paipa; en la parte centro oriental del país y noroccidental del departamento de Boyacá, a 2525 msnm; dista aproximadamente 184 km de la capital del país y 40 km de la capital del departamento. Al este del lago Sochagota se encuentran dos sistemas que almacenan aguas termominerales denominados dársenas que reciben las descargas de algunos complejos turísticos; dichos sistemas están localizados en las coordenadas planas con proyección Magna Colombia Bogotá 1107084.072 E – 1129411.173 N y 1107855.937 E – 1129155.001 N respectivamente (figura 1).

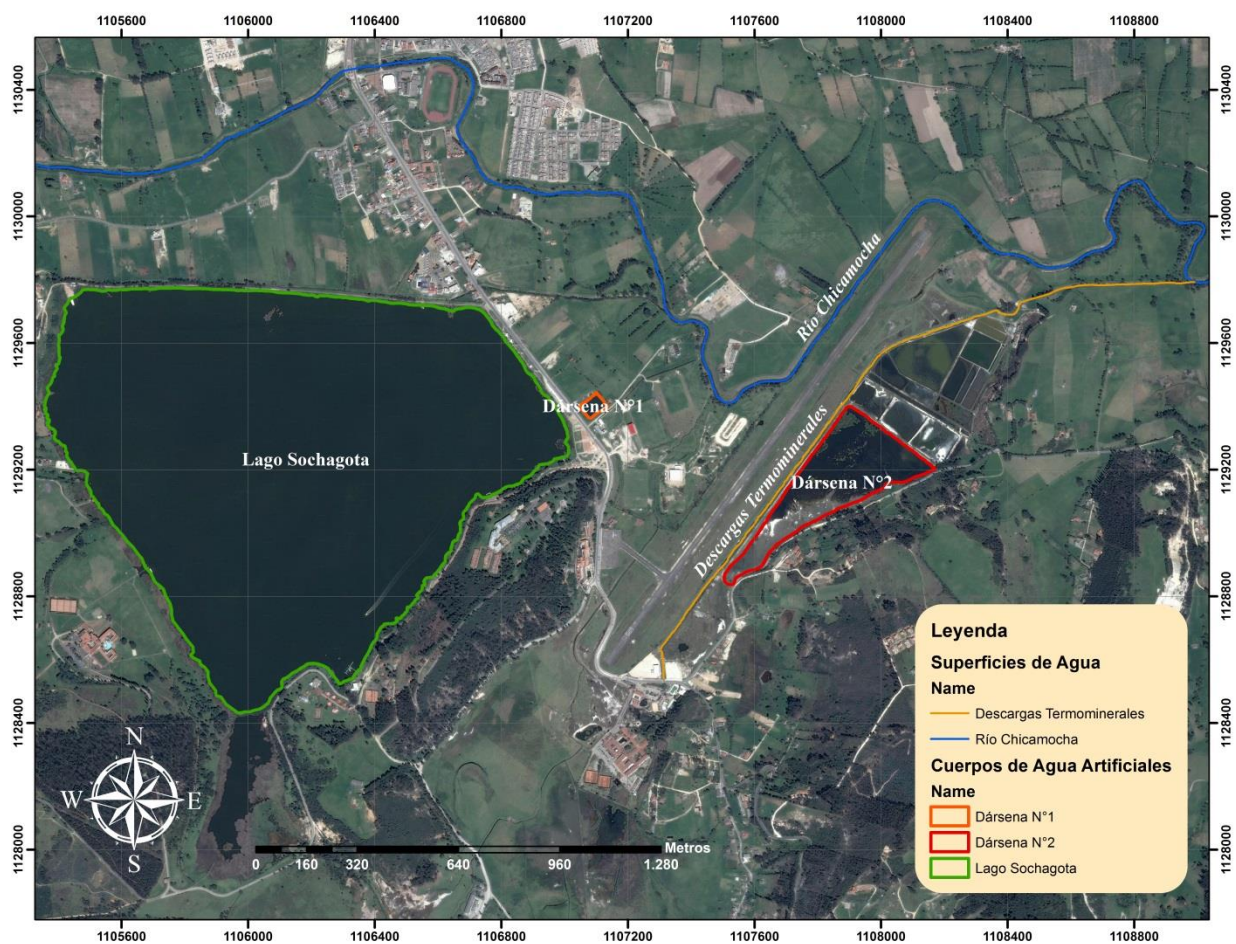


Figura 1. Localización de los sistemas dársena 1 y 2. (Fuente: elaboración del estudio a partir de imagen satelital base de Google Earth y visitas de campo).

Con la necesidad de impulsar la economía de Paipa, en 1953 se creó el lago Sochagota; así, el turismo en el municipio se elevó complementando las artesanías. A su vez, las características geológicas de la zona favorecieron la existencia de manantiales termominerales actualmente usados como atractivo turístico debido a sus diversas propiedades medicinales. No obstante, el desconocimiento sobre el impacto ambiental ha hecho evidentes

problemáticas surgidas a lo largo del tiempo motivando así diversas investigaciones con el objetivo de entender y mitigar la influencia antropogénica en la zona. Uno de esos estudios fue realizado por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), como entidad territorial y en uso de sus facultades, responde a la problemática del municipio de Paipa mediante la “Implementación de tasas retributivas por vertimientos puntuales. Determinación de la meta global de descontaminación” (Corpoboyacá, 2009). En este estudio se realizan análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los vertimientos puntuales al canal Vargas cuyas aguas desembocan al río Chicamocha, concluyendo que el agua presenta un nivel de riesgo, pues varios parámetros muestreados no cumplen con lo establecido en la normatividad colombiana.

La problemática que presenta el municipio de Paipa por el manejo de las aguas residuales y principalmente de aguas termominerales que son vertidas por la industria hotelera sin someterse a ningún tipo de tratamiento convencional, derivó en estudios en el área sobre “Identificación de las características hidrológicas y sanitarias del lago Sochagota y de fuentes de agua termomineral en el municipio de Paipa (Boyacá)” (Barco y Méndez, 2010) que tuvo como objetivo evaluar información secundaria acerca de la contaminación presente en los cuerpos hídricos en los últimos tiempos con el fin de realizar análisis fisicoquímicos. En relación con el trabajo, es un gran aporte ya que el estudio se enfoca en el agua termomineral y el posible manejo que se le puede dar dependiendo sus características fisicoquímicas que determinarán cuál puede ser su posible uso.

4.1. Salinización de las aguas subterráneas

Para comprender el origen de las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas como la concentración en sales, se debe considerar que dependen de factores tanto naturales como antrópicos, que están siempre relacionados con el comportamiento hidrodinámico del acuífero y su variación espacial y temporal.

Según Ribera (2016), los principales procesos naturales de aporte o distribución de grandes acuíferos salinos son:

- Las aguas connatas, aquellas atrapadas en el acuífero en el mismo momento de su sedimentación o proceso de formación, y que han mantenido las transformaciones químicas a lo largo del tiempo geológico.
- Incorporación de importantes volúmenes de aguas altamente salinas por la circulación de agua de recarga dulce o con capacidad de disolución, a través de formaciones evaporíticas estratificadas o de diapiros.

4.2. Definición de agua termomineral

Son las aguas minerales que se encuentran en el interior de la tierra y emanan del suelo a una temperatura de 5 °C más alta que la temperatura promedio anual del lugar donde emana. Se puede clasificar según su temperatura, origen geológico, composición mineral y pH (tabla 1). Estas aguas proceden de capas subterráneas de la Tierra, con frecuencia en líneas de falla donde pueden introducirse aguas subterráneas que aumentan su temperatura al llegar a cierta profundidad por acción de la radiación térmica generada por el núcleo del planeta y luego ascienden en forma de vapor o de agua caliente. Existe una amplia gama de usos de las aguas

termominerales como: recreación y usos medicinales del agua, calefacción, procesos industriales y generación de energía eléctrica.

Tabla 1. Clasificación y características de las aguas termominerales.

Parámetro	Clasificación
Temperatura	FRÍAS: menor a 20 °C
	HIPOTERMALES: de 20 °C a 35 °C
	MESOTERMALES: de 35 °C a 45 °C
	HIPERTERMALES: más de 45 °C
Origen geológico	MAGMÁTICAS: La que se encuentra y ha originado en el interior de magmas de poca profundidad
	PLUTÓNICAS: La que se encuentra y se ha originado en el interior de magmas a grandes profundidades, probablemente varios kilómetros
pH	ÁCIDAS: pH menor de 6,8
	NEUTRAS: pH igual a 6,8 y 7,2
	ALCALINAS: pH mayor de 7,2
Composición mineral	AGUAS BICARBONATADAS: aguas de baja mineralización, alcalinas y frías, predomina el anión bicarbonato.
	AGUAS CLORURADAS: en su composición predomina el anión cloruro y los cationes sodio, calcio y magnesio. Son frías de baja mineralización.
	AGUAS SULFATADAS: predominan los iones sulfato con diferentes cationes; su temperatura y mineralización es variable.
	AGUAS SULFURADAS: Presencia de sulfuro y sulfuro de hidrógeno

Fuente: Fagundo, Cima y Gonzalez (s.f.).

Con base en la tabla 1, las aguas termominerales en el municipio de Paipa se pueden clasificar como hipertermales ya que la temperatura del agua es de 46 a 100 °C; son aguas de origen magmático puesto que en el municipio hay actividad volcánica pasiva y son aguas sulfatadas.

4.3. Características fisicoquímicas de las aguas termominerales en el municipio de Paipa

Mediante estudios realizados por Corpoboyacá, la entidad Proagua y en colaboración con la Universidad de Boyacá, se realizó un análisis de las características fisicoquímicas en los sistemas dársena. Las mediciones de parámetros se realizaron en diversos puntos a lo largo del municipio, en la figura 2, se evidencian principalmente cuatro: entrada a la dársena 1 (Punto 1), entrada a dársena 2 (Punto 2), salida dársena 2 (Punto 3) y canal ITP salida hacia canal Vargas y río Chicamocha (Punto 4).



Figura 2. Localización de puntos de monitoreo. (Fuente: elaboración del estudio a partir de imagen satelital base de Google Earth y Proagua-Corpoboyacá, 2014).

Los resultados de los parámetros analizados en los puntos anteriormente expuestos se encuentran en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Características fisicoquímicas de las aguas termominerales en los sistemas dársena.

Parámetro	Unidades	Puntos de muestreo			
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
pH	-	7,13	8	8	8
Temperatura ambiente	°C	22	11	10	11
Temperatura agua	°C	29,2	17	19	18
Conductividad eléctrica	μS/cm	39900	41100	41800	44000
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	0,61	6,3	4,2	3,08
Nitritos	mg/L N-NO ₂ ⁻	0,5	0,2	0,025	0,025
Caudal	L/s	26,83	0	16,024	25

Parámetro	Unidades	Puntos de muestreo			
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Turbiedad	NTU	10,4	21,9	4,30	5,17
Color verdadero	UPC	38,5	29,9	27,1	18,9
Acidez total	mg/L CaCO ₃	2,8	<2,0	<2,0	<2,0
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	1 830	1900	1800	1900
Dureza total	mg/L CaCO ₃	323	337	234	256
Cloruros	mg/L Cl ⁻	3310	3730	2940	3920
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	11200	12800	1770	13100
Nitrógeno total	mg/L N	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00
Nitrógeno amoniacal	mg/L N-NH ₃	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00
Nitratos	mg/L N-NO ₃ ⁻	7,13	0,643	<0,100	<0,100
Fósforo total (reactivo)	mg/L P	1,31	1,51	1,18	1,25
Fósforo soluble o disuelto total	mg/L P	1,13	1,24	1,04	1,09
Fósforo inorgánico	mg/L P	0,986	1,13	0,879	0,946
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	17	48	<8	<8
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	<8	19	<8	<8
Sólidos Sedimentables	mL/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Sólidos Totales	mg/L	24700	26100	26200	27100
DBO ₅	mg/L O ₂	<5	<5	<5	<5
DQO	mg/L O ₂	<20	<20	<20	<20
Hierro	mg/L	1,39	1,34	0,406	0,369
Coliformes totales	NMP/100 mL	529800	159900	78800	45400
Coliformes fecales	NMP/100 mL	24000	13000	22000	540

Fuente: Proagua–Corpoboyacá (2014).

A partir de los resultados, el estudio clasifica las aguas en el sistema geotérmico como aguas sulfatadas sódicas mediante el diagrama de Piper (Proagua–Corpoboyacá, 2014c).

4.4. Identificación de impactos ambientales

Tomando como referencia las características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas termominerales, se definieron una serie de impactos sobre el recurso hídrico, mediante

la metodología de lista de chequeo simple, donde se analizará el aspecto ambiental y los impactos que puede generar (tabla 3).

Tabla 3. Identificación de impactos sobre el recurso hídrico.

Aspecto ambiental	Impacto ambiental
Vertimiento de aguas termominerales sobre el río Chicamocha	Contaminación del agua por materia orgánica
	Contaminación del agua por sólidos suspendidos
	Contaminación del agua por fósforo total
	Contaminación del agua por mineralización
	Contaminación del agua para uso agrícola

La calidad del agua es un término usado para describir las características químicas, físicas y biológicas del agua (USGS, 2017), por lo que los datos medidos pueden dar un estimado de la calidad del agua para diversos usos, mediante el análisis de índices de calidad.

Mediante índices de contaminación (ICO) del agua como ICOSUS, ICOMI ICOMO, ICOTRO, y DINIUS se pretende establecer el grado de contaminación por materia orgánica, estado trófico, sólidos suspendidos, para uso agrícola y contaminación por mineralización (procedimiento en el anexo 1). La clasificación de los resultados para estos ICO se presenta en la tabla 4.

En la tabla 5 se resumen los resultados de cada uno de los índices de calidad calculados, destacando que las aguas termominerales del municipio de Paipa tienen un potencial de contaminación muy alto cuya causal es su elevada mineralización. Cabe resaltar que las aguas presentan un grado de contaminación medio-alto, con respecto a sólidos suspendidos y uso agrícola, mientras que los valores clasificados como altos en los índices DINIUS e ICOMO corresponden a la entrada del sistema dársena 1, justificando que las aguas provenientes de los complejos hoteleros y los nacimientos de aguas termominerales a lo largo del territorio son las principales influencias en la calidad de las fuentes receptoras debido a la composición de las aguas termominerales usadas en el municipio.

Tabla 4. Clasificación de los resultados para ICO.

ICO	Caracterización	Grado de contaminación
$0.0 \leq \text{ICO} \leq 0.2$	Aguas puras y quizá con aportes biogénicos	NINGUNA
$0.2 < \text{ICO} \leq 0.4$	Con leve incidencia antrópica	BAJA
$0.4 < \text{ICO} \leq 0.6$	Notable actividad antrópica	MEDIA
$0.6 < \text{ICO} \leq 0.8$	Incidencia importante de contaminación	ALTA
$0.8 < \text{ICO} \leq 1.0$	Áreas muy contaminadas	MUY ALTA

Fuente: Ramírez, Restrepo y Cardeñoso (1999).

Tabla 5. Cálculo de los ICO.

Puntos de monitoreo	ICOSUS	ICOMI	ICOMO	DINIUS
Punto 1	0.03	1	0.79	0.67
Punto 2	0.12	1	0.60	0.471
Punto 3	0.00	1	0.66	0.471
Punto 4	0.00	1	0.71	0.464

Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá (2015).

Debido a que las concentraciones de fósforo total superaron la concentración de 1 mgP/L, todos los puntos analizados se clasifican como hipereutróficos, lo que indica que las aguas tienen un potencial para generar eutrofización en las aguas.

4.5. Comportamiento de parámetros.

4.5.1. Temperatura

De acuerdo a los datos de la tabla 2 y figura 3, aunque la temperatura del agua se mantiene dentro del intervalo establecido por la Resolución 0631 de 2015 (MADS, 2015), se presenta un valor inicial de temperatura de 29,2 °C, el cual disminuye a lo largo de los sistemas, hasta su descarga final al río Chicamocha.

La temperatura es un parámetro de suma importancia puesto que un cambio brusco en esta variable perturbaría los procesos de degradación realizados por los microorganismos dentro del sistema, además, un aumento en la temperatura acelera la descomposición de la materia orgánica e incrementa el consumo de oxígeno, disminuyendo la solubilidad del oxígeno y otros gases. De igual manera, es importante el control de la temperatura en estos vertimientos ya que en las fuentes receptoras las variaciones de este parámetro podrían generar un cambio en el ambiente de desarrollo de la fauna y la flora presente; se elevaría el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua, originando la disminución del oxígeno disuelto, lo que podría conducir a condiciones anaeróbicas de la fuente (Sierra, 2011).

4.5.2. pH

La medición de pH en los sistemas objeto de estudio (tabla 2) oscilaron entre 7,13 y 8,0. Tomando como referencia lo descrito en la normatividad se observa que los valores se encuentran dentro del intervalo establecido por el artículo 8 de la Resolución 0631 de 2015 (MADS, 2015), el cual establece un intervalo entre 6 y 9 unidades de pH para los vertimientos puntuales en aguas superficiales, lo que indica que no se generan afectaciones a las fuentes receptoras de los vertimientos en relación con dicho parámetro (figura 4).

Sin embargo, hay que considerar que el pH puede variar por procesos oxidativos de la materia orgánica presente en el agua, la cual es aprovechada por los microorganismos para realizar sus funciones vitales produciendo dióxido de carbono (CO₂) que causa acidez en el agua, cuyo intervalo en la escala de pH es de 4,5 a 8,0 (Sierra, 2011).

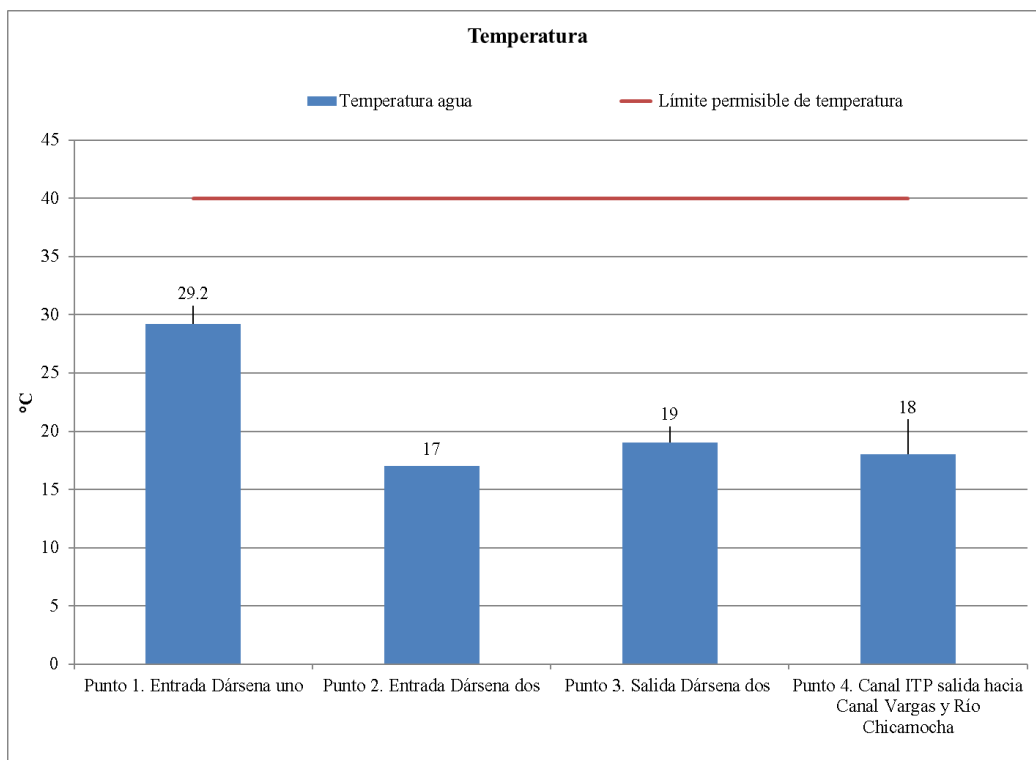


Figura 3. Temperatura en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

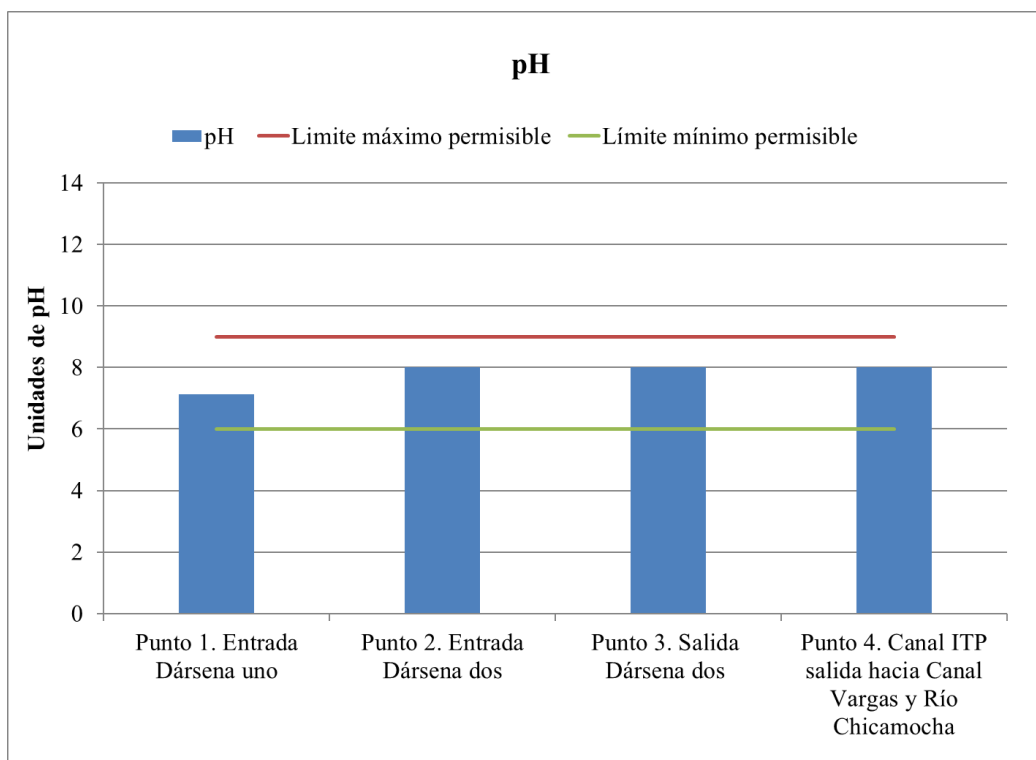


Figura 4. pH en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

Adicionalmente, la importancia de este parámetro radica en que es fundamental para los organismos que intervienen en el proceso biológico y los procesos químicos usados para

coagular las aguas residuales y desecar los lodos. Igualmente, es importante su control en los vertimientos ya que en las fuentes receptoras podría originar cambios en la fauna y la flora y ejercer influencia sobre la toxicidad de ciertos compuestos como el amoníaco y metales pesados, entre otros (Sierra, 2011).

Si bien las variaciones del pH registradas en los diferentes sistemas no son considerables, es importante tenerlos en cuenta ya que cambios en el pH de los vertimientos pueden producir, en las fuentes receptoras, efectos a largo plazo sobre el estrés de los sistemas animales y reducir las tasas de natalidad y mortalidad de algunas especies presentes (EPA, 2012).

4.5.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica en los sistemas analizados (tabla 2) osciló entre 39900 y 44000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (figura 5); este es un parámetro de gran importancia pues conocer las variaciones en la conductividad podría proporcionar información acerca de la descomposición de materia orgánica (Roldán y Ramírez 2008), así como identificar posibles procesos corrosivos en el agua debido a que los iones disueltos ligados a este parámetro determinan la velocidad de este proceso oxidativo (Kemmer y McCallion, 1988). Según la clasificación propuesta por Nisbet y Verneaux (1970), las aguas por encima de 400 $\mu\text{s}/\text{cm}$ se consideran aguas duras con alto grado de mineralización, situación que se presentó en los cuatro (4) puntos monitoreados, condición que puede deberse a las características de las aguas sulfatadas del municipio, evidenciando la alta mineralización.

4.5.4. DBO₅ y DQO

Las concentraciones de materia orgánica (DBO₅ y DQO) en los puntos monitoreados (tabla 2) arrojaron valores que se encuentran por debajo del límite de cuantificación del laboratorio (límite de la menor concentración que puede ser detectada por el equipo o el procedimiento realizado), con concentraciones de <5 mgO_2/L de DBO₅ y <20 mgO_2/L de DQO (figura 6). Esto evidencia la baja influencia que la materia orgánica podría ejercer sobre la fuente receptora.

4.5.5. Sólidos Totales

Los Sólidos Totales (ST) están compuestos por los Sólidos Disueltos Totales (SDT) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Tomando como referencia los datos obtenidos (tabla 2), las mediciones de SST arrojaron valores que oscilaron entre <8 mgSST/L valor que se encuentran por debajo del límite de cuantificación del laboratorio (límite de la menor concentración que puede ser detectada por el equipo o el procedimiento realizado), y 48 mgSST/L (figura 7).

Por otra parte, los resultados de ST (tabla 2) oscilaron entre 24700 y 27100 mgST/L (figura 8), lo cual podría indicar que las aguas termominerales del municipio de Paipa presentan en mayor concentración SDT de origen inorgánico, puesto que los sólidos de origen orgánico quedan descartados tomando como referencia las mediciones de materia orgánica en las aguas termominerales.

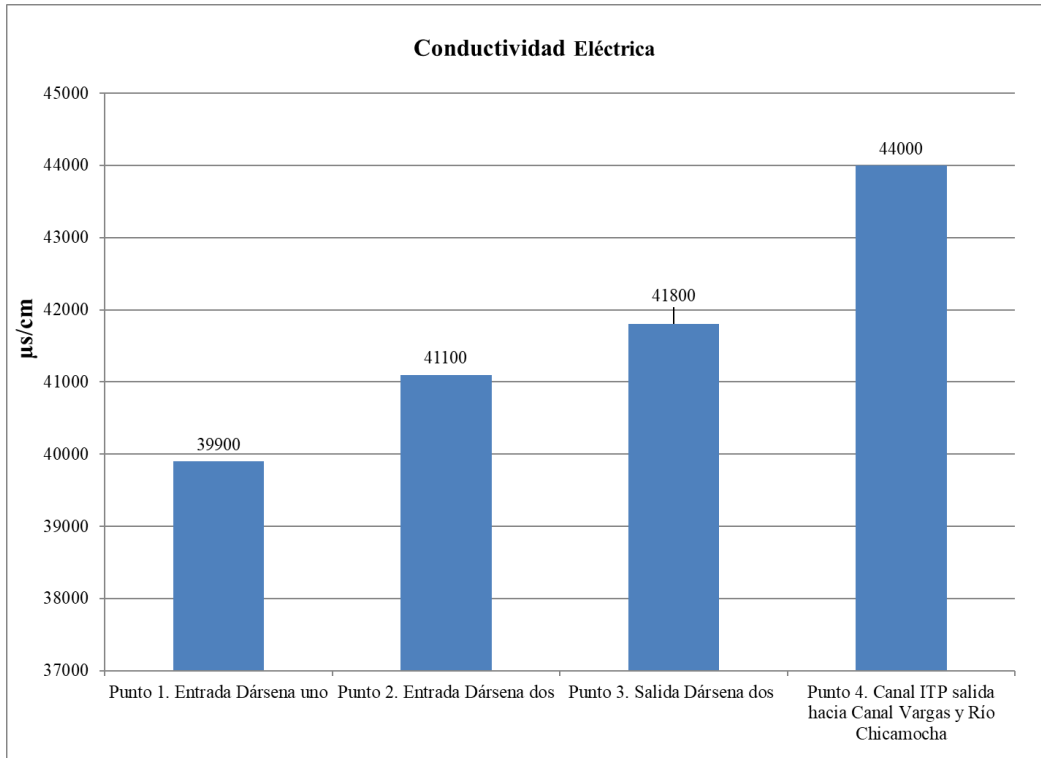


Figura 5. Conductividad eléctrica en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

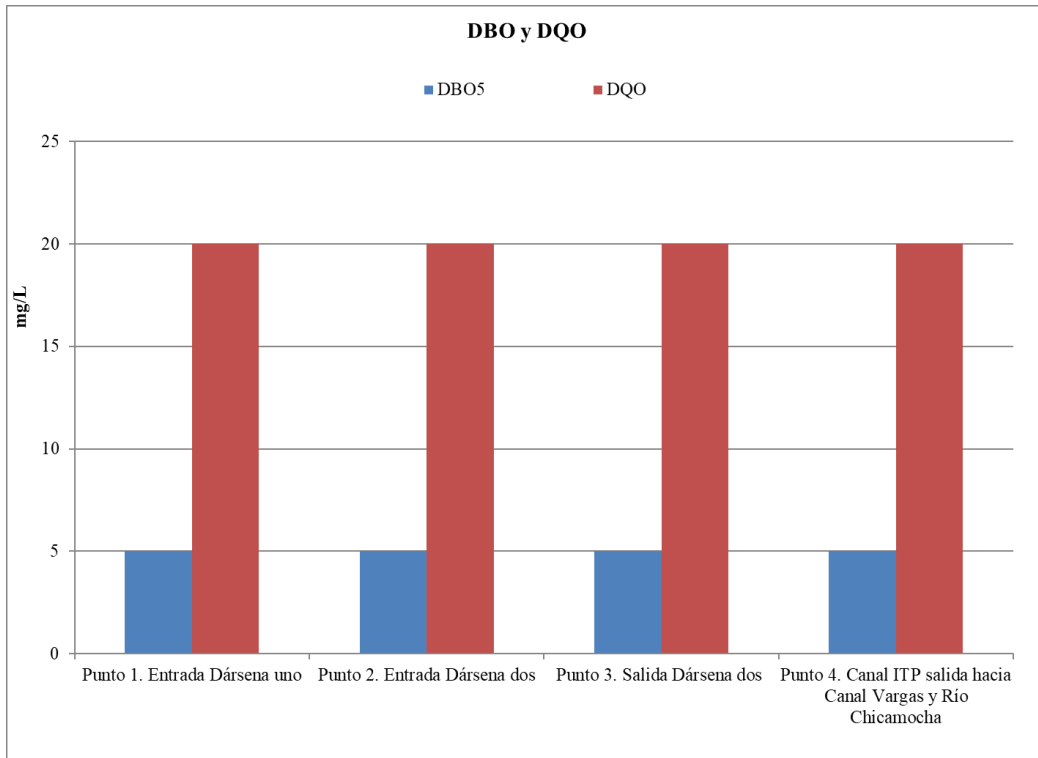


Figura 6. Concentración de materia orgánica en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

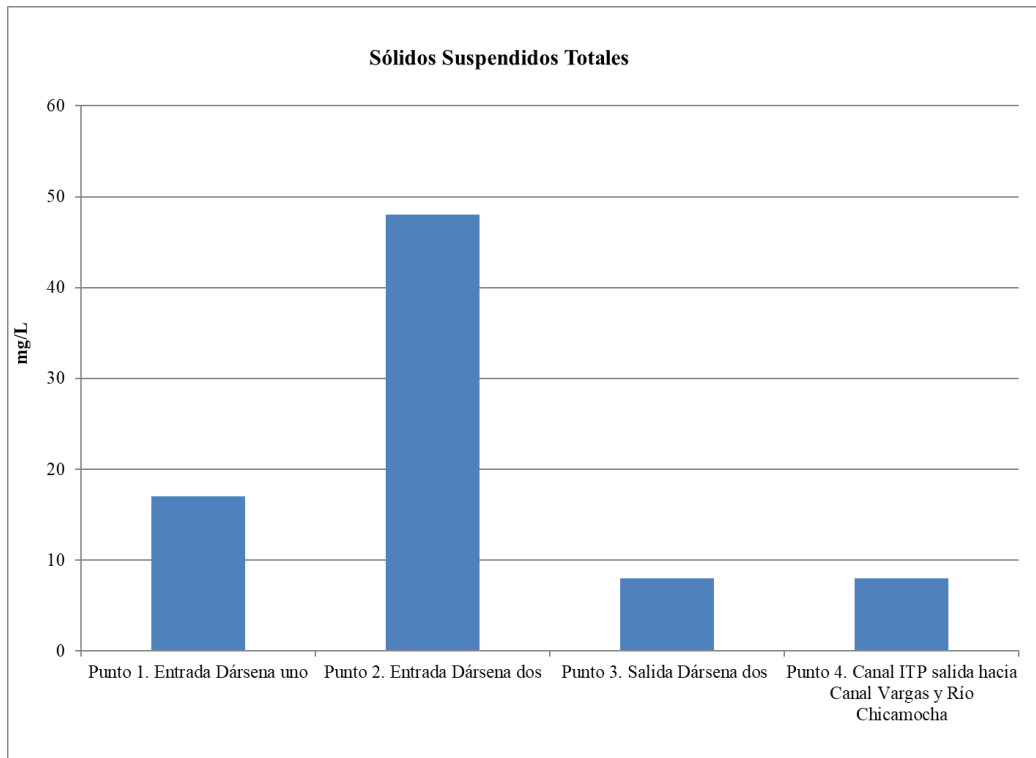


Figura 7. Concentración de SST en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

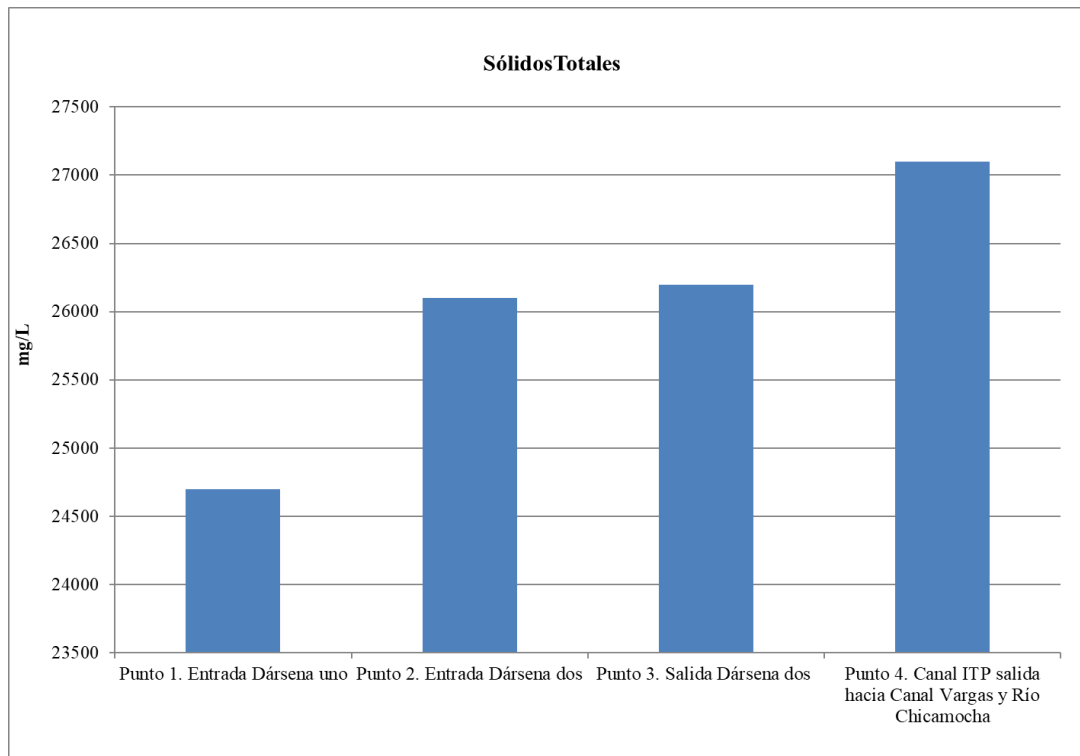


Figura 8. Concentración de ST en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

4.5.6. Sulfatos

Según los resultados de la tabla 2, las concentraciones de sulfatos oscilaron entre 1770 mg/L SO_4^{-2} y 13100 mg/L SO_4^{-2} (figura 9).

Como evidencia la figura 9 y tomando como referencia el estudio realizado por Vilasó, Crombet y Pérez (2017) concentraciones de sulfatos superiores a 1000 mg/L se consideran elevadas, por lo tanto las aguas de los puntos analizados se pueden clasificar como aguas minerales sulfadas con alta mineralización.

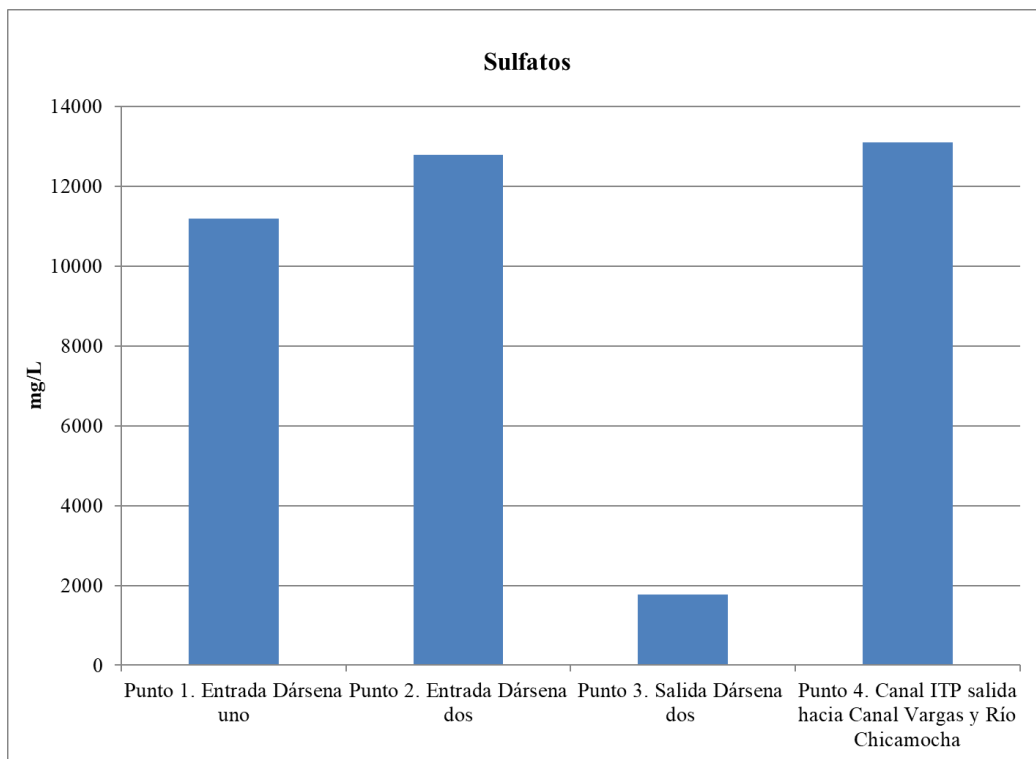


Figura 9. Concentración de sulfatos en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

4.5.7. Coliformes totales y fecales

En las figuras 10 y 11 se observan las concentraciones de coliformes totales y fecales en los puntos monitoreados (tabla 2), cuyos valores oscilaron entre 529800 y 45400 NMP/100mL para coliformes totales; en cuanto a las concentraciones de coliformes fecales, los valores oscilaron entre 24000 y 540 NMP/mL.

La medición y análisis de este parámetro es de suma importancia debido a que indica contaminación de origen fecal posiblemente por arrastre de materia orgánica en eventos de precipitación y por contacto humano, adicionalmente, este parámetro debe tenerse en cuenta a la hora de usar una fuente hídrica para riego, teniendo en cuenta que el río Chicamocha tiene ese uso por el sector agrícola del municipio, ya que puede acarrear afecciones a la salud humana si el agua no es atravesada un debido tratamiento.

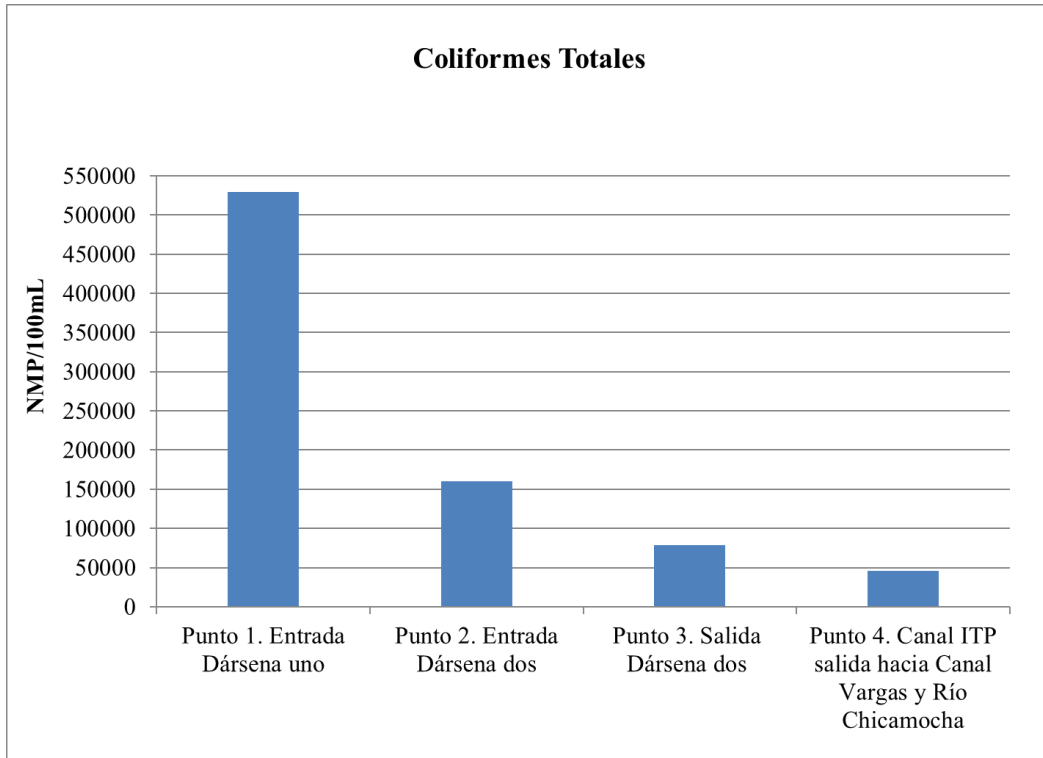


Figura 10. Concentración de coliformes totales en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

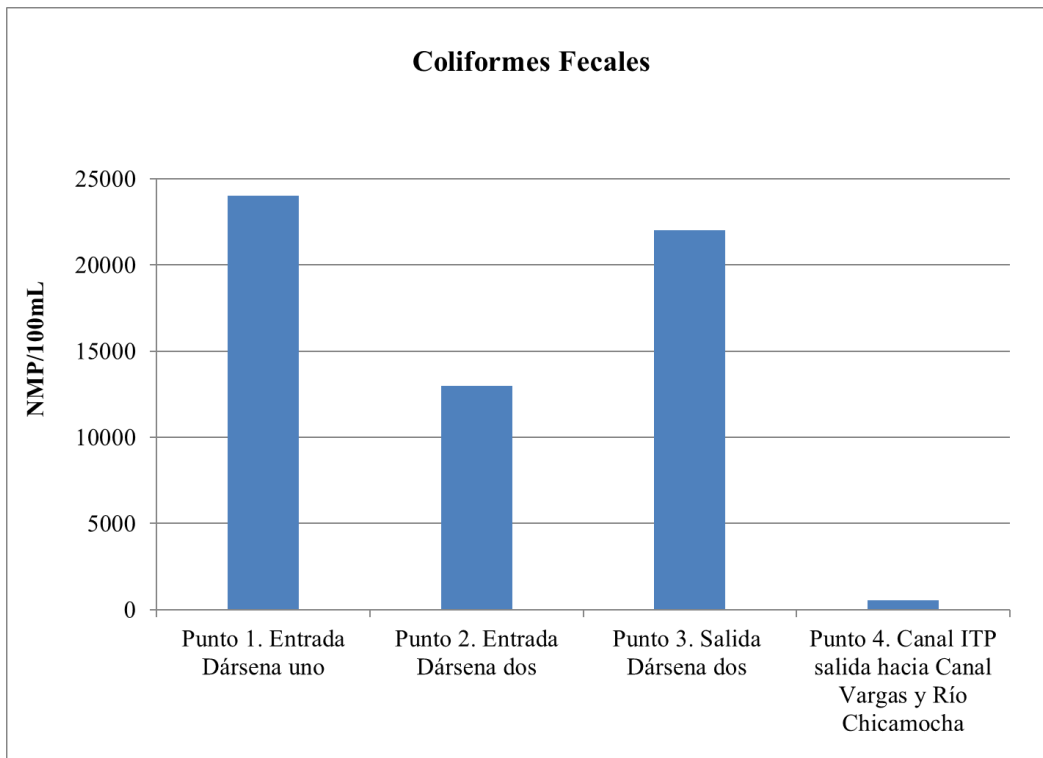


Figura 11. Concentración de coliformes fecales en los puntos monitoreados. (Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá, 2015).

5. TRATAMIENTOS APLICABLES

Es claro que el principal inconveniente que poseen las descargas de este tipo de aguas son las altas conductividades eléctricas indicando presencia de sales, por lo que a continuación se describen diversos tratamientos divididos principalmente en dos, unos enfocados al aprovechamiento del exceso de sales en un cuerpo de agua y otros para remoción o eliminación.

5.1. Métodos de obtención de sal

A continuación, se describe una medida de aprovechamiento de aguas con altas concentraciones de sales, con el objetivo de comercializar sal cristalizada para diversos usos.

5.1.1. Producción de sal mediante evaporación solar a partir de aguas termominerales

La evaporación se produce con el aumento de la temperatura, la ausencia de precipitaciones y la fuerza del viento. Por este motivo, la cosecha de la sal se lleva a cabo durante los meses de primavera y verano.

Este proceso de cristalización de la sal consiste en la formación de partículas sólidas a partir de una solución líquida. Cuando la temperatura sube, las moléculas de agua de la superficie comienzan a evaporarse, esto hace que el volumen de la salmuera se reduzca, al tiempo que aumenta la concentración de cloruro sódico. Se considera que la disolución está saturada cuando la cantidad de agua se reduce tanto que no puede disolver más cloruro sódico. A partir de este momento, la sal comienza a separarse en cristales de sal que se adhieren unos a otros y se depositan sobre la superficie de las salinas (Instituto de la sal. 2019).

La sal cristalizada se recolecta de forma manual o mecanizada y se transporta a zonas de almacenaje antes de someterla al proceso final. La que llega a las plantas de lavado contiene un 10% de salmuera atrapada (impurezas). La sal que se destina al consumo humano debe someterse a un proceso de lavado previo para conseguir la mayor pureza posible.

5.1.2. Producción de sal: proceso de evaporación inducida

Es un método adecuado para zonas frías en las que la evaporación solar es poco efectiva o cuando se quiere producir sal durante el invierno. La salmuera saturada se deposita sobre unas placas metálicas situadas encima de un fuego o cualquier otra fuente de calor que ayuda a acelerar la evaporación del agua. Se obtiene sal de grano fino. (Instituto de la sal. 2019)

5.2. Métodos para el tratamiento de aguas salinas

Teniendo en cuenta que las aguas termominerales objeto de estudio tienen grandes concentraciones de sales, para dar solución a los objetivos propuestos, se describen a continuación metodologías para el tratamiento de aguas con concentraciones salinas elevadas.

5.2.1. Electrodiálisis

La electrodiálisis es una técnica basada en el transporte de iones a través de membranas selectivas bajo la influencia de un campo eléctrico (Universidad de Alicante, s.f.). El proceso que desarrolla este sistema prueba gran viabilidad tanto en la eficiencia al remover la salinidad en el agua como de operar de manera eficiente mediante la inclusión de energía fotovoltaica, teniendo un coste de mantenimiento energético bajo.

A continuación, la figura 12 presenta el esquema de electrodiálisis en el que se usa la radiación solar como fuente principal de energía, la cual posibilita el funcionamiento del sistema.

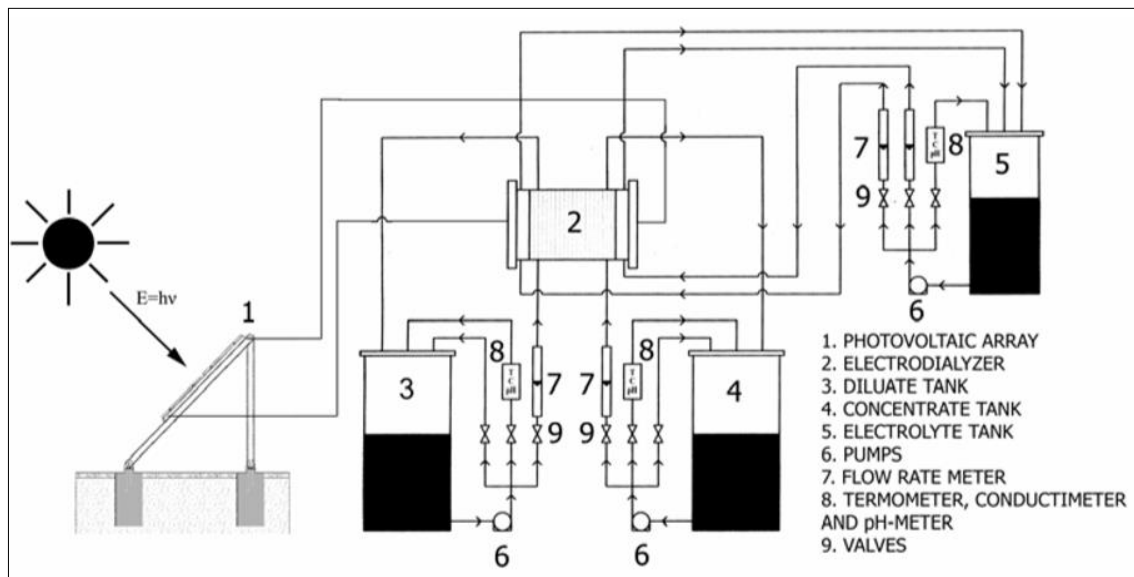


Figura 12. Esquema de electrodiálisis. (Fuente: Universidad de Alicante, s.f.).

5.2.2. Osmosis inversa

La metodología se describe a continuación mediante los procesos realizados por la empresa Befesa Agua (s.f.) en España. Se basa en la puesta en contacto de dos disoluciones, separadas por una membrana permeable al paso del agua, sobre la que se aplica una presión de forma que se establezca un flujo de agua hacia el compartimento más diluido. Debe considerarse que:

- Las membranas se colocan en módulos compactos para aumentar la superficie de contacto.

- Se necesita un pretratamiento adecuado para maximizar su vida útil.
- Se han obtenido grandes avances en la reducción de los consumos energéticos.

Como se evidencia en la figura 13, la ósmosis inversa requiere un gasto energético para generar la presión necesaria que permita el paso del líquido a tratar a través de la membrana donde, en un lado se retienen las partículas disueltas y en el otro el agua, con una alta eficiencia de remoción del contaminante.

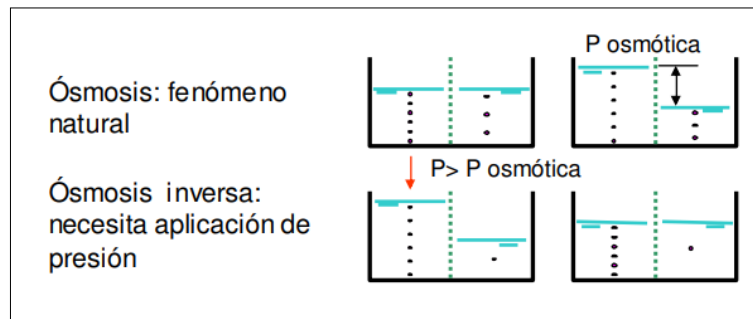


Figura 13. Tipos de ósmosis. (Fuente: Befesa Agua, s.f.).

5.2.3. Proceso aero-térmico

En el esquema del proceso aero-térmico (figura 14), el aire frío (celestes) ingresa por la parte inferior de la torre (izquierda) asciende y va aumentando su temperatura a medida que se encuentra con el agua salada caliente (verde) que ingresa por la parte superior de la misma, de esta forma el aire se va cargando con agua sin sales a medida que aumenta su temperatura saliendo por la parte superior la mezcla de aire caliente con agua pura (rojo). Posteriormente, desciende (derecha) y se enfría en un intercambiador de calor, condensando el agua pura sin sales que puede ser utilizada por ser potable (salida azul). En el intercambiador el agua salada fría que va dentro de los caños aprovecha el calor del aire que baja por la parte exterior a estos para aumentar su temperatura optimizando el proceso (Díaz. 2016).

5.2.4. Precipitación química

Esta metodología fue realizada por Martínez (2017), cuyo objetivo fue utilizar la precipitación química a unas muestras de agua para eliminar las concentraciones de sulfatos y cloruro, añadiendo una serie de reactivos que pudieran formar sales insolubles, para posteriormente ser retiradas mediante centrifugación. En la tabla 6 se presentan los reactivos usados y la eficiencia de remoción. Según estos resultados, el tratamiento con sal de bario fue el que obtuvo la mejor eficiencia en la remoción del sulfato en las muestras analizadas.

Usando el mismo método, en la tabla 7 se observa que la eliminación de cloruros no fue igual de eficiente en comparación con la remoción de sulfatos, por lo que habría que analizar otra alternativa para su remoción.

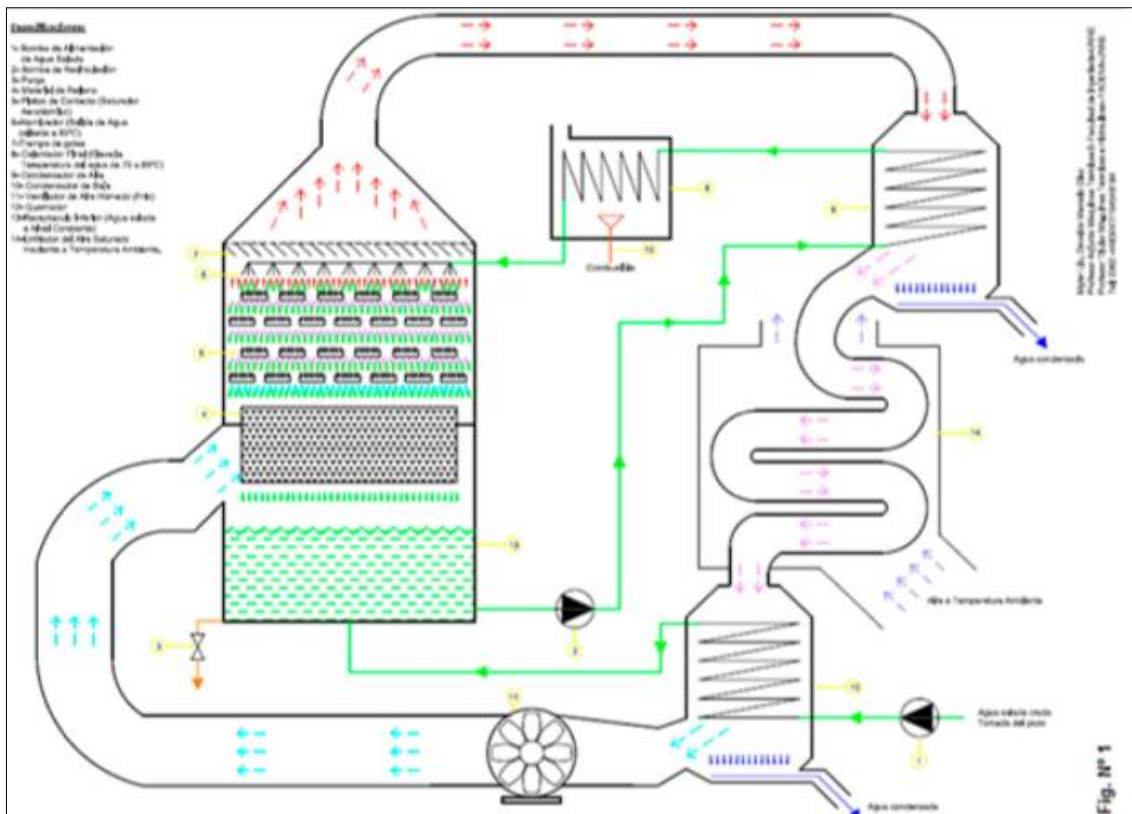


Figura 14. Esquema de funcionamiento del proceso aero-térmico. (Fuente: Díaz, 2016).

Tabla 6. Resultados obtenidos en el proceso de precipitación química.

Muestra	Tratamiento	[SO ₄ ²⁻] (mg/L)	% Eliminación de Sulfato
1	CaCl ₂	143	9.47
2	SrCO ₃	132	16.4
3	AgNO ₃	148	6.2
4	BaC ₄ H ₆ O ₄	4.82	9639
5	CaCl ₂	151	4.37
6	SrCO ₃	131	17.1
7	AgNO ₃	148	6.2

Fuente: Martínez (2017).

5.2.5. Biorreactor de membrana

Como presentan Sharghi, Bonakdarpour y Pakzadeh (2014), este método de tratamiento biológico para aguas salinas consiste en la utilización de bacterias halófilas que se inoculan creando un licor mezcla para luego pasar el agua a través de una membrana de microfiltración. El sistema contiene un medio moderadamente halófilo es decir con concentración de sales. El consorcio bacteriano dio como resultado una buena turbiedad orgánica y eliminación de salinidad. Tampoco hubo incrustaciones de membrana asociadas a

acumulación orgánica. Se observó licor mixto en todas las concentraciones de sal, pero principalmente el mecanismo de eliminación siempre fue biodegradación.

Tabla 7. Resultados obtenidos en el proceso de precipitación química.

Tratamiento	AgNO ₃ consumido (mL)	Volumen de muestra (mL)	[Cl ⁻] (mg/L)	% Eliminación de Cloruro
CaCl ₂	164	2	40812	0
SrCO ₃	15.7	20	375	0
AgNO ₃	6.5	20	145	47
BaC ₄ H ₆ O ₄	14.3	20	340	0
CaCl ₂	164	2	40812	0
SrCO ₃	16	25	306	0
AgNO ₃	8.7	25	160	41
BaC ₄ H ₆ O ₄	13.6	20	322	0

Fuente: Martínez (2017).

5.2.6. Proceso Fenton

Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en medio ácido para propiciar la formación de radicales hidroxilo (OH^{*}). A la combinación de peróxido de hidrógeno y sales de hierro se le denomina reactivo Fenton. (Chica, Peñuela y Rubio. 2016).

Sin embargo, la presencia de bicarbonatos, carbonatos, fosfatos, sulfatos y cloruros en el agua ocasiona una disminución de la reactividad del sistema Fenton (Chica, et al. 2016). Esto indica que los procesos avanzados de oxidación como medida alternativa son ineficientes para el tratamiento de las aguas termominerales debido a la alta concentración de sulfatos.

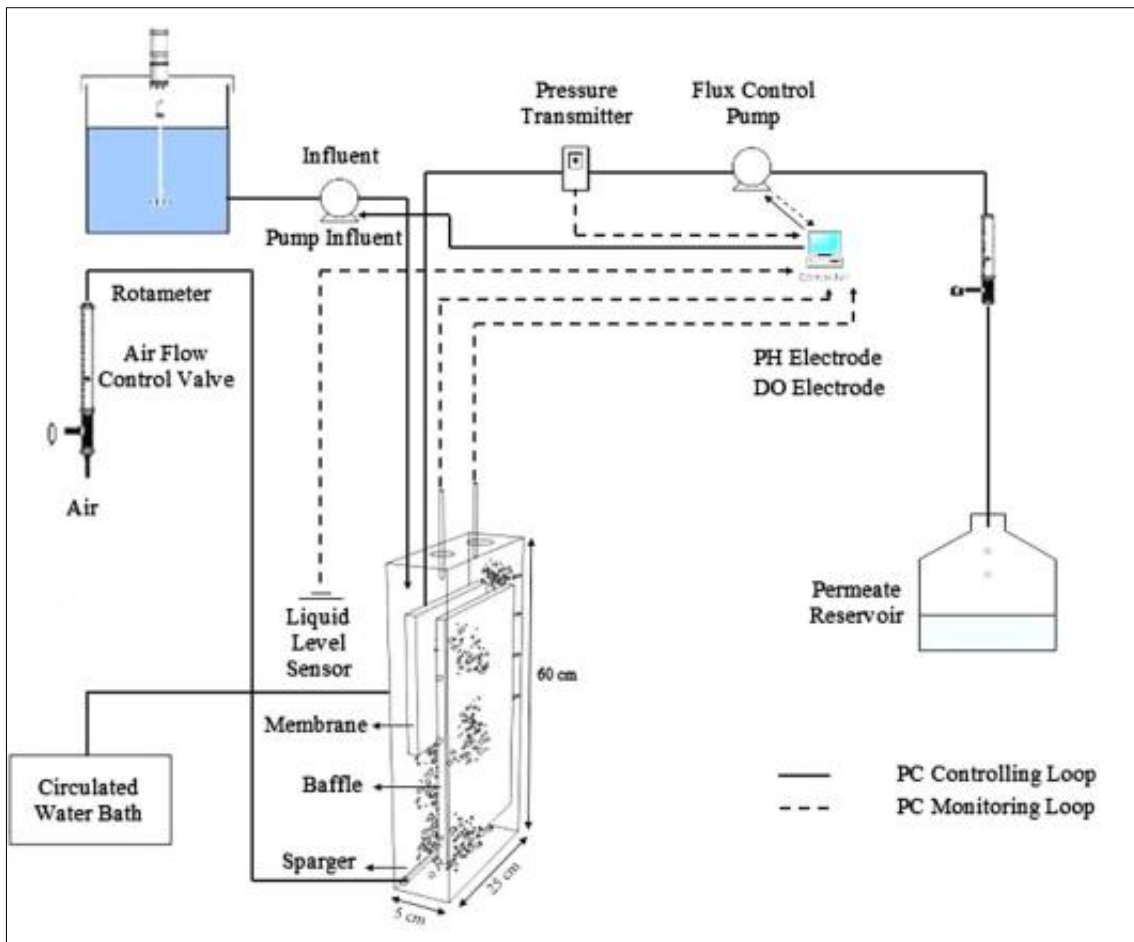


Figura 15. Esquema del biorreactor de membrana. (Fuente: Sharghi, Bonakdarpour y Pakzadeh 2014).

6. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS

6.1. Alternativas poco viables

- El tratamiento aerotérmico presentó varias limitantes, teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento, facilidad de construcción y capacidad de agua que puede tratar (500 a 2500 L/d), siendo insuficiente tomando como referencia el caudal vertido diario de 25 L/s, aproximadamente 93600 L/d; adicional al volumen que puede tratar el sistema, la concentración de sales que puede tratar es de 5000 ppm, lo cual es un valor muy bajo tomando como referencia las características de las aguas objeto de estudio.
- Cabe resaltar que la precipitación química mostró resultados favorables en cuanto a la remoción de sulfatos; no obstante, se puede considerar inviable debido a los subproductos generados lo cual acarrearía un aumento en costos si el objetivo es aprovechar de alguna manera las sales precipitadas.
- El tratamiento de evaporación inducida resulta económico puesto que la inversión a realizarse corresponde a la adecuación de áreas donde se establecerán las piscinas de secado, no obstante, tiene una limitante y es que se depende de las épocas de estiaje, específicamente de la intensidad de la radiación solar, haciendo ineficiente el sistema en periodos de invierno.

6.2. Tratamiento propuesto

Una alternativa para este tipo de aguas es un sistema donde se incluya el uso de energías alternativas como la radiación solar la cual alimentará el consumo energético de una planta de tratamiento con un proceso de evaporación inducida, puesto que, al igual que varias alternativas vistas en capítulos anteriores, la aplicación de estos procesos acarrea consumos energéticos que deben considerarse altos. El consumo energético de una fuente renovable e ilimitada podría favorecer la continua operación de la planta, tiene un bajo costo de aprovechamiento, tras la inversión inicial en la fabricación de los componentes y la instalación, que es la que puede resultar más costosa.

De manera inicial, se puede establecer un proceso de cribado donde se remuevan sólidos flotantes que pueda tener el agua termomineral, como arenas y sólidos en suspensión, una vez se han removido estos materiales se desvía el agua mediante gravedad o bombeo a lechos de secado sobre placas metálicas donde una vez se haya evaporado el agua se puede extraer sal que, dependiendo el uso, se le da un debido tratamiento y se podría aprovechar. De esta manera, como se vio en el apartado de índices de calidad (punto 4.4), se mitigaría el impacto que se está generando sobre el río Chicamocha por el vertido de aguas con tan alto grado de mineralización.

De acuerdo con las características de las aguas y el área de que se dispone para la adecuación del sistema de tratamiento, es necesario realizar estudios previos que permitan elegir la mejor opción en cuanto las exigencias económicas, sociales y ambientales del municipio.

Para la definición de la zona de estudio se pueden tener en cuenta una serie de condiciones (Cortes y Lesmes, 2014):

- La ubicación sea de fácil acceso y exista un seguimiento y monitoreo de la distribución del recurso por parte del municipio de Paipa.
- Esté ubicada a más de 3 km de cualquier zona urbana para evitar problemas con la comunidad por efectos del ruido y olores.
- Que su ubicación no interfiera con algún ecosistema, hábitat o zona especial de protección.
- Que las características físicas del suelo sean las apropiadas para la ubicación de la planta.

7. CONCLUSIONES

- Se identificaron diferentes alternativas para dar manejo y aprovechamiento a las aguas termominerales del municipio de Paipa (Boyacá), cuyo principal objetivo es el tratamiento de aguas con altos contenidos de sulfatos.
- Mediante la información recopilada se establecieron impactos que puede generar las características fisicoquímicas de las aguas termominerales sobre una fuente receptora, estableciendo los principales agentes contaminantes, y determinando que aguas con tan alto grado de mineralización pueden generar una alteración a sistemas naturales.
- Las diferentes alternativas identificadas cumplen con el objetivo de remover o tratar las altas concentraciones de sulfatos en una muestra de agua, no obstante, es de suma importancia analizar los costos de inversión y mantenimiento, así como si se generan o no subproductos de difícil manejo.
- Los diferentes criterios a considerar para el diseño del sistema de tratamiento, debe estar acompañado tanto de un estudio socio-económico como geográfico, pues la debida localización del sistema de tratamiento, influye directamente en los costos de operación y mantenimiento, como es el caso de la localización de la bocatoma, si se usa la gravedad es menos costoso que si se necesitaran sistemas de bombeo; de igual manera, es importante tener en cuenta el caudal a tratar, esto es fundamental para lograr dimensionar las diferentes estructuras y su distribución espacial en el terreno disponible del municipio en cuestión.
- Algunas de las aguas termominerales producto de los hoteles vertidas a las dársenas fluyen mediante canales abiertos los cuales son fácilmente afectados por factores externos que alteran sus características fisicoquímicas; por tanto, para garantizar que el afluente a la dársena sea exclusivamente de aguas termominerales provenientes de las piscinas, se recomienda establecer una tubería que transporte dichas aguas.
- Mediante el análisis de la viabilidad de los procesos avanzados de oxidación en la degradación de subproductos generados por la precipitación química haría viable la aplicación de esta metodología para tratar las aguas salobres puesto que al no existir la incógnita del tratamiento de estos residuos se puede tratar eficientemente aguas con contenidos altos de sulfatos.

8. ANEXO 1

8.1. Determinación de índices de calidad

Las determinaciones de ICO como ICOSUS, ICOMI ICOMO, ICOTRO se realizan según la metodología presentada por Ramírez y Cardeñosa (1999) mientras que la determinación del índice DINIUS se utiliza la metodología de González, Caicedo y Aguirre (2013).

8.1.1. ICOSUS

Se determina mediante la concentración de SST (ecuación 1).

$$\text{ICOSUS} = -0.02 + 0.003 * \text{SST (mg/L)} \quad (1)$$

SST > 340 mg/L tienen un ICOSUS = 1

SST < 10 mg/L tienen un ICOSUS = 0

Los resultados se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Determinación del índice ICOSUS.

SST (mg/L)	ICOSUS
17	0.03
48	0.12
8	0
8	0

Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá (2015).

8.1.2. ICOMI

Contiene la conductividad eléctrica como reflejo de los SDT, dureza total por los cationes de calcio y magnesio y la alcalinidad por los aniones (ecuación 2).

$$\text{ICOMI} = \frac{1}{3} * (\text{I}_{\text{Conductividad}} + \text{I}_{\text{Dureza}} + \text{I}_{\text{Alcalinidad}}) \quad (2)$$

En la que:

$$\text{I}_{\text{Conductividad}} = \text{Conductividades mayores a } 270 \mu \frac{\text{S}}{\text{cm}} \text{ tienen un índice de 1} \quad (2.1)$$

$$I_{\text{Dureza}} = \text{Durezas mayores a } 110 \text{ mg/L tienen un índice de } 1 \quad (2.2)$$

$$I_{\text{Alcalinidad}} = \text{Alcalinidades mayores a } 250 \text{ mg/L tienen un índice de } 1 \quad (2.3)$$

Los resultados se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Determinación del índice ICOMI.

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Dureza total (mg CaCO_3/L)	Alcalinidad total (mg CaCO_3/L)	ICOMI
39900	323	1830	1
41100	337	1900	1
41800	234	1800	1
44000	256	1900	1

Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá (2015).

8.1.3. ICOMO

Índice de calidad por materia orgánica el cual se calcula mediante la DBO y coliformes totales, ya que estos dos parámetros reflejan fuentes diferentes de contaminación por materia orgánica (ecuación 3).

Los resultados se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Determinación del índice ICOMO.

DBO ₅ (mg O ₂ /L)	Coliformes totales (NMP/100mL)	% saturación de O ₂	ICOMO
5	529800	$\frac{\text{OD m (0.61mg/L)}}{\text{OD t (7.7mg/L)}} * 100 = 8$	0.79
5	159900	$\frac{\text{ODm (6.3mg/L)}}{\text{ODt (9.7mg/L)}} * 100 = 65$	0.6
5	78800	$\frac{\text{ODm (4.2mg/L)}}{\text{ODt (9.3mg/L)}} * 100 = 45$	0.66
5	45400	$\frac{\text{ODm (3.08mg/L)}}{\text{ODt (9.6mg/L)}} * 100 = 32$	0.71

Fuente: Adaptado de Proagua–Corpoboyacá (2015).

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

En la que:

$$I_{\text{DBO}} = -0.05 + 0.7 * \text{Log DBO (mg/L)} \quad (3.1)$$

$$I_{\text{Coliformes}} = 1 \text{ (Cuando coliformes totales es mayor a 20000 NMP/mL (3.2))}$$

$$I_{\text{Oxígeno \%}} = 1 - 0.01 * PS_{\text{OD}} \quad (3.3)$$

8.1.4. ICOTRO

Se determina mediante la concentración de fósforo total como presenta la tabla 11.

Tabla 11. Intervalos para ICOTRO.

Estado trófico	Fósforo total (mg/L)
Oligotrofia	<0.01
Mesotrófica	0.01 - 0.02
Eutrofia	0.02 - 1.00
Hipereutrófia	>1.00

Fuente: Ramírez et al. (1999).

8.1.5. DINIUS

Para el cálculo de este índice se requieren 12 parámetros listados en la tabla 12:

Tabla 12. Determinación del índice DINIUS.

Parámetros	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	Valor medido	Peso relativo	Valor medido	Peso relativo	Valor medido	Peso relativo	Valor medido	Peso relativo
pH	7.13	0	8	0	8	0	8	0
Temperatura agua	29.2	0	17	0	19	0	18	0
Conductividad eléctrica	39900	0.079	41100	0.079	41800	0.079	44000	0.079
Oxígeno Disuelto	0.61	0.109	6.3	0	4.2	0	3.08	0.109
Color verdadero	38.5	0.063	29.9	0.063	27.1	0.063	18.9	0.063
Alcalinidad total	1830	0.065	1900	0.065	1800	0.065	1900	0.065
Dureza total	323	0.065	337	0.065	234	0.065	256	0.065
Cloruros	3310	0.074	3730	0.074	2940	0.074	3920	0.074
Nitratos	7.13	0.09	0.643	0	0.1	0	0.1	0
DBO ₅	5	0	5	0	5	0	5	0

Parámetros	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	Valor medido	Peso relativo	Valor medido	Peso relativo	Valor medido	Peso relativo	Valor medido	Peso relativo
Coliformes totales	529800	0.09	159900	0.09	78800	0.09	45400	0.09
Coliformes fecales	24000	0.116	13000	0.116	22000	0.116	540	0
ICO	0.75		0.55		0.55		0.55	

El índice de calidad DINIUS determina considerando si el parámetro a evaluar cumple con la normatividad ambiental vigente o con valores teóricos; si cumple el valor es cero, si no cumple, se le asigna el peso relativo establecido por la metodología de Dinius (Gonzales, Caicedo y Aguirre, 2013)

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barco Rincón, Luis Manuel; Méndez Angarita, Maritza. Identificación de las características hidrológicas y sanitarias del lago Sochagota y de fuentes de agua termomineral en el municipio de Paipa (Boyacá). Universidad Industrial de Santander. 2010. Disponible en: <https://docplayer.es/amp/14822639-Identificacion-de-las-caracteristicas-hidrologicas-y-sanitarias-del-lago-sochagota-y-de-fuentes-de-agua-termomineral-en-el-municipio-de-paipa-boyaca.html>
- Befesa Agua. Análisis de Configuraciones del Proceso O.I. en Desalación [en línea]. Befesa Agua S.A.U., España. Disponible en: https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/19S5-P1-Jorge_Salas-PPTACC.pdf
- Castro Mahecha, Jennifer. Evaluación De Alternativas Para El Tratamiento De Aguas Termominerales Del Municipio De Paipa. Universidad de Boyacá. 2005.
- Chica, Edwin L.; Peñuela, Gustavo A. Rubio, Ainhoa. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. Ingeniería y Competitividad, Volumen 16. 2014. [En línea] Disponible en: http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/%20article%20/view%20/3696
- Corpoboyacá. Implementación de tasas retributivas por vertimientos puntuales. Determinación de la meta global de descontaminación [en línea]. Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), Informe Técnico Consejo Directivo, Tunja: 2009. Disponible en: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/931>
- Cortes, L. & Lesmes, L. Simulación de una planta desalinizadora de agua de mar, por medio del *software IMS desing* como estrategia para fortalecer el desarrollo social del norte caribe colombiano- municipio de Uribía – La Guajira [en línea]. Universidad Libre, Bogotá. 2014. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11251/Proyecto%20Desalaci%C3%B3n%20Guajira-Colombia.pdf?sequence=1>
- Díaz, O.M. Desalinizador aero-térmico en las últimas etapas de patentamiento por la UNNE. [en línea]. Revistas UNNE. 2016. Disponible en: <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/eitt/article/view/2772/2454>
- EPA. United States Environmental Protection Agency. *Guidelines for Water Reus.* U.S. Agency for International Development. 2012 Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>
- Fagundo, J. Cima, A. Gonzalez, P. Revisión bibliográfica sobre clasificación de las aguas minerales y mineromedicinales. Centro nacional de termalismo Cuba. Disponible en: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bal/clasificacion_aguas_minerales.pdf
- González, Viky. Caicedo, Orlando. Aguirre, Nestor. 2013. Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, DINIUS y BMWP. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169427489003.pdf>
- Instituto de la sal. España. Consultado en octubre de 2019. <https://www.institutodelasal.com/es/sobre-la-sal/produccion-de-la-sal>

- Kemmer, Frank & McCallion, John. 1988. Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Editorial McGraw-Hill.
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, República de Colombia. Bogotá, 2015.
- Martínez, S. Estudio de la minimización de la presencia de cloruros y sulfatos en el agua tratada de la EDAR del Valle del Vinalopó (Alicante) [en línea]. Universidad de Alicante, España. 2017. Disponible en: <http://www.agroambient.gva.es/documents/163005665/163975683/UA-Estudio+minizacion+presencia+cloruros+y+sulfatos+agua+tratada+edar+Valle+Vinalop%C3%B3+Boluda+Martinez+2017.pdf/a5243ca8-7d64-4e00-a1e5-0f6316b40bfe>
- Nisbet, M. and Verneaux, J. (1970) Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. Annales de Limnologie. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/limn/1970015>
- Proagua-Corpoboyacá. 2015. Modelación hidráulica. Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), contrato de consultoría CCC2014010.
- Ramírez, Restrepo, R., & Cardeñosa, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. formulaciones. SCIELO. Disponible en : http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100008
- Ribera, Fidel. (2016). Salinidad y aguas subterráneas. Fundación centro internacional de hidrología subterránea. Barcelona. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/308327108_SALINIDAD_Y_AGUAS_SUBTERRANEAS
- Roldan. Gabriel, Ramírez. John. Fundamentos de Limnología tropical [en línea]. 2 ed. [Antioquia]: Editorial, Universidad de Antioquia, 2008. [Revisado 17 de julio de 2017]. Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=FA5Jr7pXF1UC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbp_atb&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Sharghi, E.A., Bonakdarpour, B. & Pakzadeh, M. (2014). Treatment of hypersaline produced water employing a moderately halophilic bacterial consortium in a membrane bioreactor: Effect of salt concentration on organic removal performance, mixed liquor characteristics and membrane fouling. In: Bioresource Technology, 164, p.p. 203-213 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.099>
- Sierra, C.A. 2011. Calidad del agua, evaluación y diagnóstico. Primera edición. Editorial ediciones de la U. 460 p. Disponible en: https://www.academia.edu/9511155/Calidad_del_agua_evaluaci%C3%B3n_y_diagn%C3%B3stico
- Universidad de Alicante. Desalinización de aguas salobres mediante sistemas de electrodiálisis alimentados con energía solar fotovoltaica. [en línea]. Universidad de Alicante, España. Disponible en: <https://web.ua.es/es/leqa/documentos/oferta-tecnologica/desalinizacion-de-aguas-salobres-alimentada-por-energia-solar.pdf>
- USGS. Cartilla sobre calidad del agua. 2017. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-027-01/pdf/FS-027-01.pdf>

- Vilasó, Javier. Crombet, Sandra y Pérez, Norma. (2017). Algunos parámetros químico-físicos de las aguas del "Lago Azul" del poblado "El Cobre". Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Oriente. Cuba. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212017000300010