

Evaluación de la contaminación por aluminio del agua para consumo humano, región central de Colombia

Evaluation of aluminum contamination of water for human consumption, central region of Colombia

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.04>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 26/06/2019. Fecha de Aceptación: 03/11/2020

Oscar Efren Ospina Zúñiga 

Universidad Piloto de Colombia. Cundinamarca, (Colombia)
Oscar-ospinal@unipiloto.edu.co

Oscar Hernán Cardona García 

Universidad Cooperativa de Colombia. Ibagué, (Colombia)
Oscar.cardona@campusucc.edu.co

Para citar este artículo:

O. Ospina Zúñiga & O. Cardona García “L Evaluación de la contaminación por aluminio del agua para consumo humano, región central de Colombia”, INGE CUC, vol. 17, no. 2, pp. 31–41. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.04>

Resumen

Introducción— El aluminio se incorpora al agua de manera natural y/o antrópica, con niveles de riesgo para la salud por encima de 0.2 mg/L según la normativa colombiana. Puede surgir como contaminante emergente al utilizarse inadecuadamente coagulantes de sales de aluminio en la clarificación del agua potable.

Objetivo— Evaluar la contaminación por aluminio del agua para consumo humano de la región central de Colombia, determinando su potencial origen y cumplimiento de la normativa vigente.

Metodología— La investigación de carácter exploratorio, analizó la presencia de aluminio en agua cruda y tratada durante el período 2007–2018, mediante muestras y ensayos de laboratorio, así como la evaluación hidráulica y de operación de plantas de tratamiento de agua, en municipios de los departamentos de Tolima y Cundinamarca, región central de Colombia.

Resultados— En más del 30% de los municipios evaluados se evidenció la presencia de aluminio en el agua para consumo humano, por encima del máximo permitido por la normativa vigente. En varios casos se debió a deficiencias en el proceso de tratamiento donde se utilizan sales de aluminio para la coagulación, sin dosificación adecuada como ocurrió en el municipio de Melgar, o por altas concentraciones presentes en las fuentes hídricas de abastecimiento, como es el caso del río Magdalena en la región central de Colombia.

Conclusiones— El aluminio en agua para consumo humano, se da por su presencia en fuentes hídricas y producto de deficiencias hidráulicas y operativas en el proceso de clarificación de las plantas de tratamiento donde se usa sulfato de aluminio como coagulante, por inadecuada aplicación de dosis óptimas, deficiente intensidad de agitación y de gradientes de velocidad en mezcla rápida y floculación, tiempos de floculación y sedimentación fuera del rango óptimo.

Palabras clave— Aluminio; agua; riesgo; salud; clarificación

Abstract

Introduction— Aluminum is incorporated into water naturally and/or anthropically, health risk levels above 0,2 mg /l according to Colombian regulations. It can arise as an emerging contaminant when aluminum salt coagulants are used improperly in the clarification of drinking water.

Objective— To evaluate air pollution for human consumption in the central region of Colombia, determine its potential origin and compliance with current regulations.

Methodology— Exploratory research, analysis of the presence of aluminum in raw water and treated during the period 2008-2018, by means of samples and laboratory tests, as well as the hydraulic evaluation and the operation of water treatment plants, in municipalities of Los departments of Tolima and Cundinamarca, central region of Colombia.

Results— In more than 30% of the municipalities evaluated, the presence of aluminum in the water for human consumption was evidenced, above the maximum allowed by the current regulations. In several cases it was due to deficiencies in the treatment process where aluminum salts are used for coagulation, without adequate dosage as occurred in the municipality of Melgar, or due to high concentrations present in the water supply sources, such as the case of Magdalena river in the central region of Colombia.

Conclusions— Aluminum in water for human consumption is due to its presence in water sources and the product of hydraulic and operational deficiencies in the clarification process of treatment plants where aluminum sulfate is used as a coagulant, due to inadequate application of optimal doses, poor intensity of agitation and speed gradients in fast mixing and flocculation, flocculation and sedimentation times outside the optimal range.

Keywords— Aluminum; water; risk; health; clarification

I. INTRODUCCIÓN

El control de la calidad del agua para consumo humano establecido a partir del año 2007 con la expedición de la Resolución 2115 [1] y el Decreto 1575 [2], permitió registros que muestran la presencia retrospectiva de contaminación por aluminio en sistemas de acueducto de varios municipios del departamento del Tolima y de Cundinamarca, exponiendo a una vasta población urbana al riesgo que implica consumirlo durante tiempo prolongado y por encima del máximo permisible por la normativa nacional e internacional, con su consecuente efecto en la salud humana.

La evaluación de las plantas de tratamiento que expusieron alto contenido de aluminio en el agua para consumo, buena parte presentaron deficiencias hidráulicas y operativas en el proceso de clarificación, donde se usa sulfato de aluminio como coagulante, encontrándose la inadecuada aplicación de dosis óptimas por deficiencia o ausencia de ensayos en el equipo de jarras; o por deficiente intensidad de agitación y de gradientes de velocidad en la mezcla rápida y floculación; el uso de coagulación por barrido cuando las condiciones de calidad de agua cruda exigen por adsorción; tiempos de floculación y sedimentación por fuera del óptimo [3], [4].

El tipo de coagulante usado también influyó en el residual de aluminio, porque en la mayoría de municipios afectados se usan como coagulantes, compuestos inorgánicos de aluminio (sulfato de aluminio), caracterizado por dejar residuales y permitiendo solubilizarse el aluminio en el agua clarificada y post-floculación en la red de distribución, tanques de almacenamiento y albercas domiciliarias; pero en aquellas plantas de tratamiento donde se usaron Coagulantes Policloruros de Aluminio-PAC como integrantes de una nueva generación de coagulantes alternativos, dieron mejor desempeño respecto a mínimos residuales de aluminio [3], [4].

II. REVISIÓN LITERARIA

El aluminio es un componente natural del agua superficial y subterránea debido, principalmente, a que forma parte de la estructura de las arcillas y puede estar presente en forma soluble en sistemas coloidales responsables de la turbiedad; se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente, considerándose tóxico para el crecimiento de las plantas en suelos ácidos. Es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre; las intervenciones antropogénicas contribuyen a su liberación con incidencia de enfermedades en la población y acumulaciones dañinas en el ambiente [5].

En el agua de lluvia puede estar presente al hacer contacto con contaminantes en la atmósfera, como el caso de la ciudad de Ibagué (Colombia) [6], Ciudad de México (México) [7], o por operaciones masivas con aerosoles como en la ciudad de Whangarei (Nueva Zelanda) [8]. Algunas fuentes hídricas superficiales evidencian concentraciones de aluminio de riesgo para la salud humana, como el caso del río Gualaguaychú (Uruguay) [9], el río Cachavi (Ecuador) [10], el río Sonora (México) [11], los ríos Curaray, Arabela y Napo [12] y el río Chacapalca (Perú) [13]. Las aguas subterráneas pueden estar expuestas a altas concentraciones de aluminio, como lo evidencia un estudio realizado en Valencia (España) [14] y en pozos de Zimapán (México) [15].

El aluminio puede incorporarse al agua para consumo humano como un contaminante emergente por residual del proceso de clarificación, crucial en la potabilización del agua. Este tratamiento permite la remoción de buena parte de las impurezas presentes en el agua cruda, utilizándose coagulantes convencionales para la desestabilización de las partículas y que han mostrado ser efectivos en este propósito [16]; o algunos de ellos pueden dejar remanentes de aluminio durante el tratamiento, como lo evidencia el estudio realizado en el agua de tanques y grifos de viviendas abastecidas por el acueducto de Bogotá (Colombia) [17], siendo 0.20 mg/L la concentración máxima permitida por la normatividad colombiana [1], esto debido a su potencial riesgo para la salud humana por encima de este rango, pudiendo causar enfermedades óseas, hepatobiliares, anaemia, esclerosis lateral amiotrófica, síndrome de Dawn, mal de Parkinson [18], y asociado también a trastornos del sistema nervioso central como son la encefalitis, enfermedad de Alzheimer y otros trastornos degenerativos [19].

III. METODOLOGÍA

La investigación realizada con diseño metodológico exploratorio y descriptivo, evaluando las concentraciones de aluminio en el agua cruda y tratada, según la recopilación de registros históricos disponibles de calidad de agua para 55 localidades urbanas, de las cuales 47 corresponden al departamento del Tolima y ocho de la provincia del Alto Magdalena en el departamento de Cundinamarca (Colombia) [20], durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 2007 al 2016 (Fig. 1).

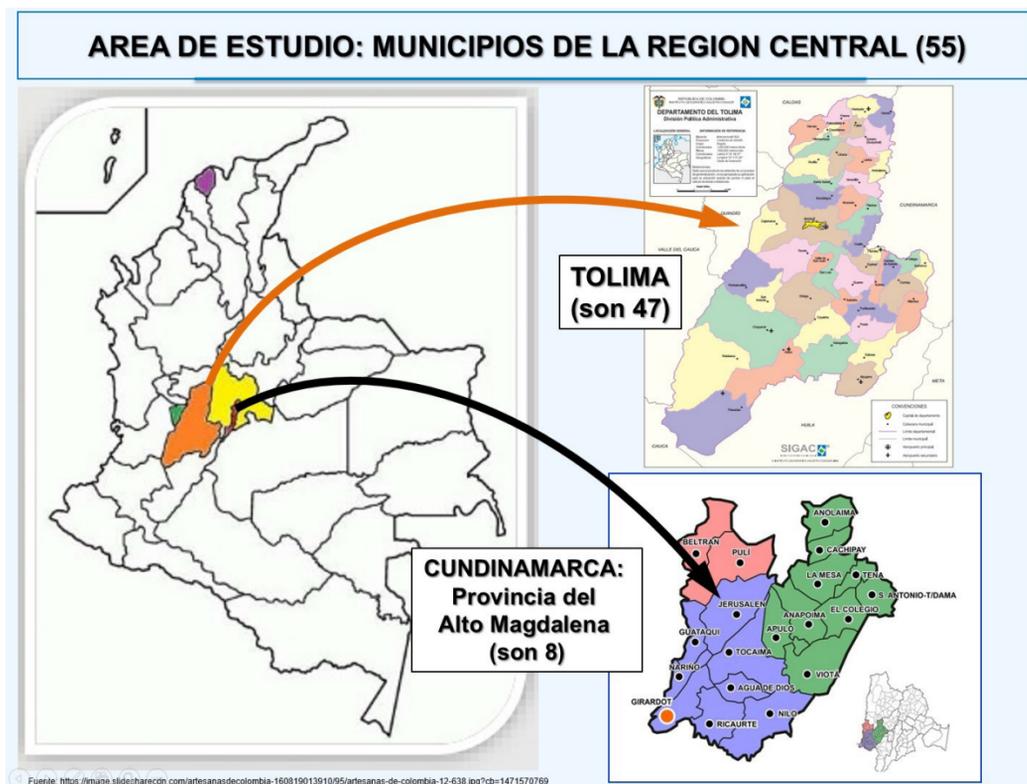


Fig. 1. Localización geográfica de los 55 municipios en estudio de la región central de Colombia. Fuente: Autores.

Adicionalmente, se evaluó mediante muestreos y ensayos de espectrofotometría, la concentración de aluminio presente en el agua cruda (fuente hídrica de abastecimiento) y tratada de los municipios de Ibagué [21] y Melgar [3] del departamento del Tolima, y de los municipios de Nariño y Ricaurte [4] del departamento de Cundinamarca, según las estaciones de muestreo descritas en la Tabla 1; el cual incluye el tipo de mezcla rápida donde se aplica el coagulante en la masa de agua, que cada uno de ellos posee, para realizar su evaluación hidráulica para verificar su eficiencia con relación a los requerimientos técnicos establecidos en la normativa vigente en Colombia, RAS [22].

TABLA 1. ESTACIONES DE MUESTREO PARA ENSAYOS DE AGUA CRUDA Y TRATADA Y MEZCLA RÁPIDA EXISTENTE, MUNICIPIOS EVALUADOS DE LOS DEPARTAMENTOS DE TOLIMA Y CUNDINAMARCA.

Departamento	Municipio	Fuente hídrica	Estaciones de muestreo		Mezcla rápida
			Agua Cruda	Agua Tratada	
Tolima	Ibagué	Río Combeima	7	1	Canaleta parshall W = 3'
	Melgar	Río Sumapaz	1	2	Canaleta parshall W = 1'
Cundinamarca	Ricaurte	Río Magdalena	1	2	Canaleta parshall W = 1'
	Nariño		1	2	No posee

Fuente: Autores.

La evaluación comprendió la revisión visual del comportamiento del fluido en dicha estructura y realización de su levantamiento topográfico arquitectónico, para calcular los parámetros que evidencian su eficiencia, como el número de Froude, el tiempo de mezcla y el gradiente de velocidad.

En la Fig. 2 se indica la ubicación con sus correspondientes coordenadas geográficas de los tres puntos de muestreo establecidos en Melgar (Tolima).

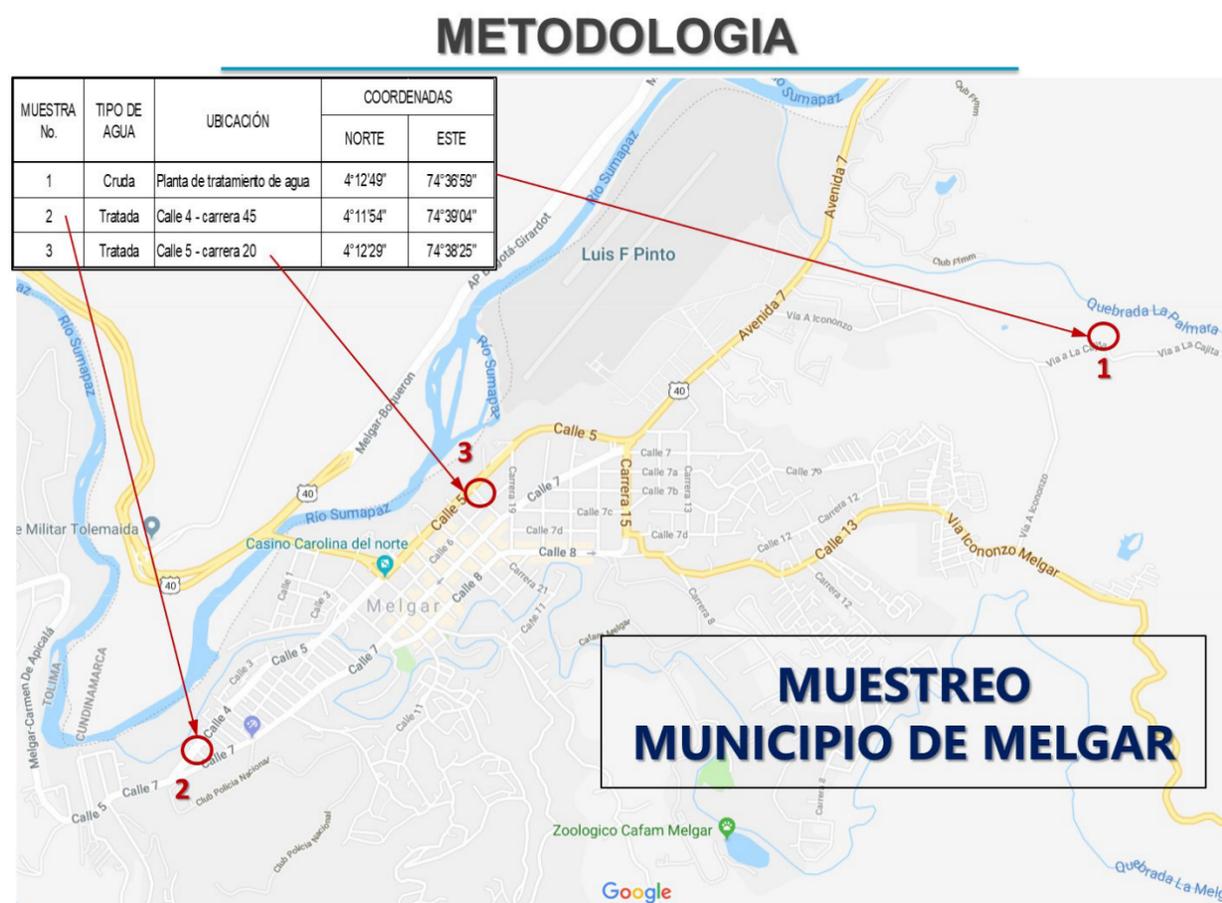


Fig. 2. Localización de los tres puntos de muestreo en Melgar (Tolima).
Fuente: Autores.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los registros de calidad de agua para consumo humano durante el periodo 2007 al 2016 de las zonas urbanas del departamento del Tolima [20], se determinó la presencia de aluminio con concentraciones superiores al rango máximo permisible por la normativa (0.2 mg/L) [1], en 27 de los 47 municipios, y en 15 de ellos no se realizó tratamiento del agua (Tabla 2).

El análisis permite determinar que de los 27 municipios del departamento del Tolima con concentración de aluminio superior al rango máximo permisible, indicados con punto rojo (Fig. 3), en 25 de ellos se realizó tratamiento del agua usando para la clarificación coagulantes con aluminio.

En Rioblanco y Villarrica, donde no se realizó tratamiento del agua, la procedencia del aluminio se debió a que venía incorporado en su fuente hídrica abastecedora, al ser parte de los 15 municipios sin tratamiento, indicados con punto azul (Fig. 3). En los otros 13 municipios restantes, no se presentaron concentraciones de aluminio por encima del máximo permisible.

De lo anterior se puede colegir que en los 25 municipios que realizaron tratamiento, el alto nivel de aluminio en el agua para consumo pudo presentarse como un emergente del proceso de clarificación, donde se usaron coagulantes con aluminio.

TABLA 2. MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE TOLIMA CON PRESENCIA DE ALUMINIO EN EL AGUA PARA CONSUMO HUMANO, POR ENCIMA DEL RANGO MÁXIMO PERMISIBLE, PERÍODO 2006-2017.

Municipio	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Alpujarra											
Alvarado	x	x	x	x	x		x	x			
Ambalema							x	x			
Anzoátegui											
Armero		x	x	x							
Ataco											
Cajamarca		x	x								
Carmen de Apicalá											
Casabianca											
Chaparral			x	x	x	x	x	x			
Coello	x						x	x			
Coyaima	x	x	x	x	x	x	x				
Cunday						x	x				
Dolores											
Espinal											
Falan		x	x	x		x	x				
Flandes				x	x						
Fresno			x	x							
Guamo				x							
Herveo			x								
Honda			x	x	x	x	x				
Ibagué	x										
Icononzo		x	x	x	x						
Lérida	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Líbano											
Mariquita											
Melgar		x	x	x	x		x	x			
Murillo											
Natagaima											
Ortega				x	x		x	x			
Palocabildo											
Piedras		x	x	x	x	x	x	x			
Planadas											
Prado											
Purificación		x	x	x			x	x			
Rioblanco	x	x	x	x	x		x	x	x	x	
Roncesvalles											
Rovira											
Saldaña			x	x		x	x	x			
San Antonio	x						x				
San Luis											
Santa Isabel											
Suárez											
Valle de San Juan			x			x					
Venadillo	x	x	x	x	x		x				
Villahermosa											
Villarrica						x	x	x			
			Presencia de aluminio por encima del máximo permisible.								
			Municipio sin tratamiento de agua para consumo humano.								

Fuente: [3].

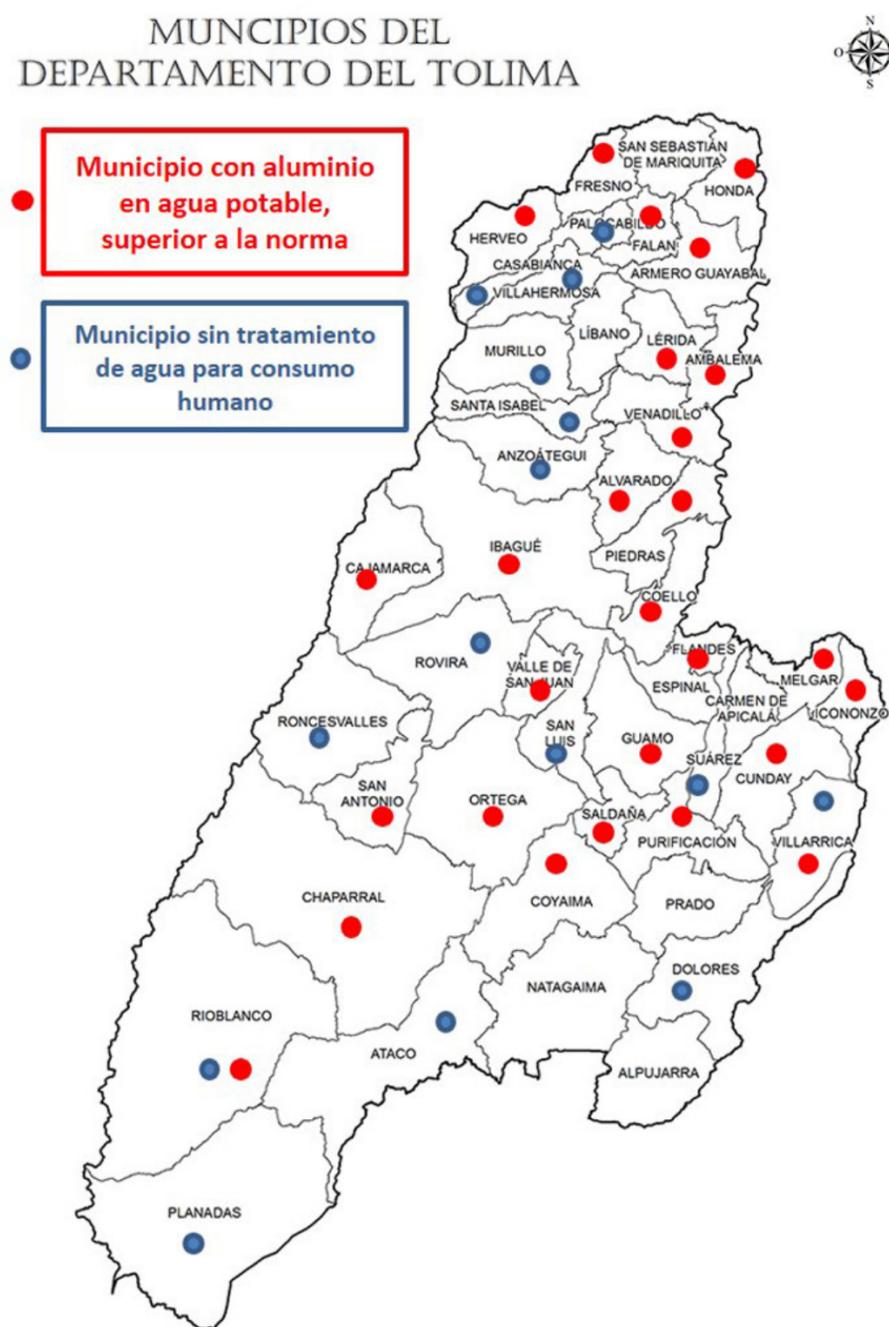


Fig. 3. Municipios del departamento del Tolima, con aluminio superior a la norma en agua para consumo humano y sin tratamiento de agua, período 2007-2016. Fuente: Autores.

A. Municipio de Melgar - Tolima

En este municipio se realizaron ensayos para determinar la concentración de aluminio en agua cruda y tratada. Se evidenció la presencia de residuales de aluminio en el agua para consumo, y se utiliza actualmente como coagulante el sulfato de aluminio tipo B. Los resultados de laboratorio (Tabla 3), muestran que su fuente hídrica, el río Sumapaz, posee bajo contenido de aluminio, pero una vez tratada, sufre incremento, tal como lo refleja los valores de la muestra No. 3.

TABLA 3. ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA CRUDA Y TRATADA DEL ACUEDUCTO URBANO DEL MUNICIPIO DE MELGAR, TOLIMA.

Muestra No.	Tipo de agua	Turbiedad (NTU)	pH	Conductividad	Color (UPC)	Hierro (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Cruda	39.70	7.79	79	250	0.50	0.07
2	Tratada	1.43	6.71	96	13	0.16	0.11
3	Tratada	0.74	5.47	353	14	0.34	1.44

Fuente: [3].

La mezcla rápida se realiza mediante agitación hidráulica en una canaleta Parshall con ancho de garganta 1 ft, donde se genera el resalto hidráulico que además sirve de aforador, la cual debe garantizar la dispersión rápida y homogénea de los coagulantes [23], sin embargo, la aplicación del químico se está haciendo por fuera del resalto hidráulico que no corresponde al sitio de mayor turbulencia de la garganta de la canaleta (Fig. 4), que puede conllevar a mezcla no homogénea del coagulante con la masa de agua, ineficiencia en la desestabilización de las fuerzas electrostáticas de las partículas en suspensión y coloidales presentes en el agua, por consiguiente deficiente formación de floc y residuales de aluminio en el agua tratada [23].



Fig. 4. Canaleta Parshall de la PTAP de Melgar - Tolima.
Fuente: [3].

B. Municipio de Ibagué - Tolima

La trazabilidad de aluminio a lo largo del río Combeima, fuente hídrica de abastecimiento de la ciudad de Ibagué, se hizo en 7 estaciones de muestreo y a sus tres principales afluentes, quebradas Guamal, Las Perlas y La Plata (Fig. 5), además de un punto en la red de distribución del sistema de acueducto [21].

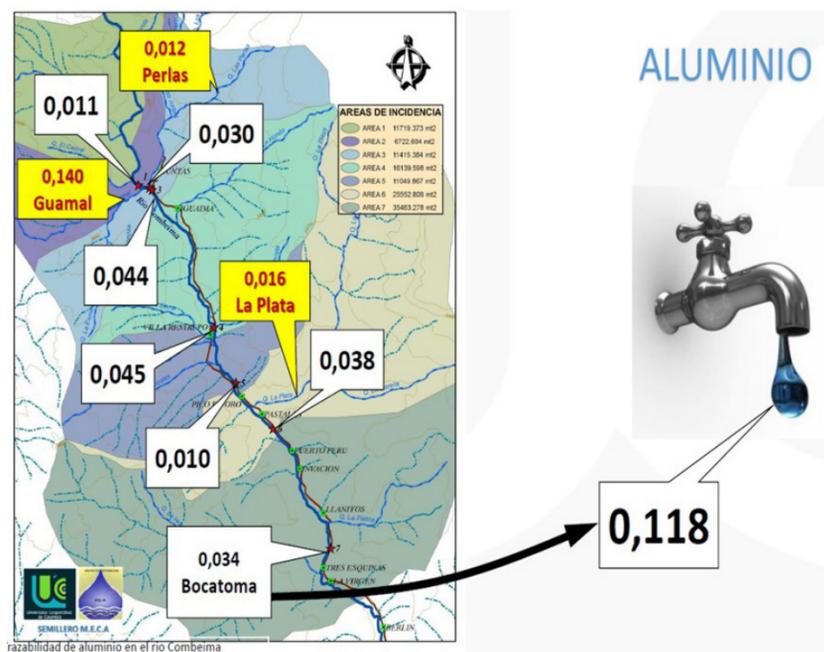


Fig. 5. Trazabilidad de aluminio en mg/L a lo largo del río Combeima, municipio de Ibagué.
Fuente: [21].

Los resultados obtenidos muestran variabilidad de la concentración de aluminio a lo largo del río Combeima (Fig. 5), contribuyendo en ello la descarga de diferentes afluentes y aguas residuales de población residente en su cuenca, hasta el sitio de captación del sistema de acueducto que corresponde al último punto en el río, donde la concentración arrojada fue de 0.034 mg/L y en la red de distribución 0.118 mg/L, mostrando incremento producto del proceso de tratamiento, pero cumple con lo establecido en la normativa vigente [1], al estar por debajo del máximo permisible de 0.2 mg/L.

De los tres afluentes evaluados, la quebrada Guamal fue la de mayor aporte de aluminio, con una concentración de 0.14 mg/L. El aporte de caudal de fuentes hídricas que desembocan en el río Combeima, pueden contribuir a disminuir la concentración de aluminio en el mismo, presentándose la variabilidad indicada (Fig. 5).

C. Municipio de Nariño - Cundinamarca

El sistema de acueducto de este municipio se abastece del río Magdalena (Fig. 6), en el cual se evidenció concentración de aluminio por encima del máximo permisible para consumo humano, según los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el sitio de captación [4] (Tabla 4).



Fig. 6. Toma de muestra de agua en el río Magdalena, captación del acueducto de Nariño, Cundinamarca. Fuente: [4].

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados al agua en la red de distribución del acueducto, arrojaron valores inferiores a la concentración obtenida en el río Magdalena, incluso por debajo del máximo permisible para consumo humano (Tabla 4). El coagulante utilizado en la planta de tratamiento es hidroxiclorigenato de aluminio.

TABLA 4. ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA CRUDA Y TRATADA DEL ACUEDUCTO URBANO DEL MUNICIPIO DE NARIÑO, CUNDINAMARCA.

Municipio de Nariño		
Muestra	Tipo de agua	Aluminio (mg/l)
1	Cruda	0.287
2	Tratada	0.033
3	Tratada	0.139

Fuente: [4].

D. Municipio de Ricaurte - Cundinamarca

Al igual que el municipio de Nariño, el sistema de acueducto de Ricaurte se abastece del río Magdalena, cuya concentración de aluminio está por encima del máximo permisible para consumo humano, según los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el sitio de captación (bocatoma), llevados al laboratorio para su análisis (Tabla 5). El coagulante utilizado en la planta de tratamiento es hidroxiclorigenato de aluminio.

Los ensayos realizados al agua en la red de distribución del acueducto, arrojaron concentraciones inferiores a la obtenida en el río Magdalena, incluso por debajo del máximo permisible para consumo humano (Tabla 5).

TABLA 5. ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA CRUDA Y TRATADA DEL ACUEDUCTO URBANO DEL MUNICIPIO DE RICAURTE (CUNDINAMARCA).

Municipio de Ricaurte		
Muestra	Tipo de agua	Aluminio (mg/l)
1	Cruda	0.269
2	Tratada	0.046
3	Tratada	0.048

Fuente: [4].

V. CONCLUSIONES

En varios municipios de la región central de Colombia, la concentración de aluminio en el agua para consumo humano estuvo por encima del rango máximo permisible, durante el periodo 2008-2018, en general por su incorporación como residual del tratamiento y específicamente en el proceso de clarificación (coagulación-floculación-sedimentación) donde se usan coagulantes a base de sales de aluminio.

Las deficiencias de funcionamiento hidráulico y operativas en las plantas de tratamiento, el inapropiado punto de aplicación y tipo de coagulante usado, pueden conllevar a residuales altos de aluminio en el agua tratada [3], como se evidencia en el caso del municipio de Melgar, Tolima, donde además de utilizar sulfato de aluminio tipo B, su aplicación se da por fuera del punto de la mezcla rápida desaprovechando el resalto hidráulico allí formado, donde ocurre la intensidad de agitación y por ende el gradiente de velocidad adecuado para el proceso [24]. Para el caso del municipio de Ibagué, Tolima, el riesgo de aluminio no ocurre porque su fuente hídrica de abastecimiento presenta concentraciones bajas y el proceso de tratamiento ocurre eficientemente.

En la región central de Colombia, el río Magdalena presentó concentración de aluminio por encima del rango máximo permitido para consumo humano, lo cual implica riesgo para la salud de no realizar el tratamiento adecuado, siendo un reto tecnológico requiriéndose para ello además del proceso convencional: coagulación-floculación-sedimentación-filtración, adicionar procesos específicos no convencionales como puede ser ósmosis inversa o intercambio iónico, entre otros [25].

Los municipios de Nariño y Ricaurte presentaron agua cruda con concentración de aluminio por encima del rango máximo permisible, pero en el agua tratada cumplió. El coagulante utilizado se refiere a hidroxiclorigenato de aluminio, que posee mayor capacidad de formación de floculos y, por ende, una reacción más completa sin el subsecuente riesgo de aluminio residual [26], lo cual sí sucede con el sulfato de aluminio [27].

Buena parte del aluminio presente en el agua para consumo urbano en el departamento del Tolima, obedece a un contaminante como subproducto incorporado en el mismo tratamiento del agua y específicamente en la clarificación [3], donde por problemas operativos y/o técnicos se está haciendo el proceso de forma ineficiente. Los fallos en el proceso de clarificación que se realiza en las plantas de tratamiento, obedece a ineficiencias operativas por la no realización de ensayos de tratabilidad por ausencia de equipos o por desconocimientos técnicos, no determinación de dosis óptimas, deficiente medición de caudal, deficiencias hidráulicas en los procesos de mezcla rápida, floculación o sedimentación.

Las consecuencias que ocasiona el consumo permanente por encima del rango máximo permisible y a largo plazo de aluminio [19], puede estar acarreando consecuencias en la salud humana de una vasta población urbana del Tolima, que bien merece ser revisado para evitar consecuencias futuras de incidencia en la salud.

La presencia de altos contenidos de aluminio en el agua implica un costo económico adicional por exceso de este insumo químico, cuyo costo se ve reflejado en la tarifa que cada usuario debe pagar para sostener el sistema de acueducto, que para localidades con bajos ingresos económicos familiares puede poner en riesgo su sostenibilidad y en algunas ocasiones se suspende.

REFERENCIAS

- [1] República de Colombia MINIAMBIENTE, “Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano,” *Resolución 2115*, DO, No. 46679, 22 Jun. 2007. Disponible en http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf
- [2] República de Colombia, Ministerio de la Protección Social, “Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano,” *Decreto 1575*, DO, No. 46.623, 9 May. 2007. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Disponibilidad-del-recurso-hidrico/Decreto-1575-de-2007.pdf>
- [3] O. Ospina, O. Cardona & L. Bulla, “Evaluación de la contaminación del agua para consumo humano, por aluminio,” *Investigación*, UCC. Ibagué, Col, 2018.
- [4] O. Ospina, D. Leal & Y. Granados, “Evaluación de la contaminación del agua para consumo humano por aluminio, provincia del Alto Magdalena, departamento de Cundinamarca,” *Investigación*, UPC. Girardot, Col, 2018.
- [5] R. Torrellas, “La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud,” *Tecnogestión*, vol. 9, no. 1, pp. 3–11, 2012. Disponible en <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/articled/view/5646/7188>
- [6] O. Ospina-Zúñiga & H. Ramírez-Arcila, “Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia,” *Ing Solidario*, vol. 10, no. 17, pp. 125–138, 2014. <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.812>
- [7] R. García, “El agua de lluvia de la CDMX, no apta para consumo humano directo,” *Boletín UNAM-DGCS-670*, Ciudad Universitaria, CDMX, 15 Oct. 2018. Disponible en http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_670.html
- [8] C. Swinney, “Du baryum et de l'aluminium trouvés dans l'eau de pluie à Whangarei,” *Overblog*, [comentario blog], 25 Jul. 2010. Available: <http://actu-chemtrails.over-blog.com/article-du-baryum-et-de-l-aluminium-trouves-dans-l-eau-de-pluie-a-whangarei-54452315.html>
- [9] Comisión administradora del río Uruguay, “Monitoreo conjunto en la desembocadura del río Gualeguaychú en el río Uruguay,” *Ingreso No.78*, CARU, R., UY., Nov. 2017. Recuperado de <https://www.cancilleria.gob.ar/userfiles/2017/monitoreo-conjunto-gualeguaychu-nov-2017-ing78.pdf>
- [10] I. Alarcón, “Aguas servidas y aluminio amenazan a los ríos de la zona 1,” *El Comercio*, [online], 5 Jun. 2018. Disponible en <https://www.elcomercio.com/actualidad/aguasservidas-aluminio-amenaza-rios-sanlorenzo.html>
- [11] X. Barrientos, M. P. Domínguez & U. Guzmán, “Remediación de ríos: el caso del río Sonora,” presentado al *XII Encuentro participación de la mujer en la ciencia*, CIO, CDMX, 2015. Disponible en http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion5/S5-CS04.pdf
- [12] W. Chota-Macuyama, F. W. Chu-Koo, C. R. García-Dávila, D. Castro-Ruiz, R. A. Ismiño-Orbe, A. García-Vásquez, H. Sánchez-Riberiro, L. Arévalo & J. S. Tello-Martín, “Calidad ambiental de los ríos Curaray, Arabela y Napo (Loreto, Perú),” *Folia Amazonia*, vol. 23, no. 2, pp. 157–170, 2014. <https://doi.org/10.24841/fa.v23i2.21>
- [13] J.C. Llavilla, “Evaluación de metales pesados en el agua de los ríos de Pataqueña y Chacapalca del distrito de Ocuiviri, Lampa – Puno,” *Rev Cien Invest Amb*, vol. 1, no. 2, pp. 53–63, 2018. Disponible en <http://revistas.upsc.edu.pe/journal/index.php/RIAM/articled/view/22>
- [14] A. Padrino, L. Moreno, E. Garrido & A. Azcón, “Contenido en metales pesados de las aguas subterráneas en la ciudad de Zaragoza,” pp. 381–392, 2001. Disponible en http://aguas.igme.es/igme/publica/con_recu_acuiferos/036.pdf
- [15] F. Pérez, F. Prieto, A. Rojas, C. Galán, Y. Marmolejo, C. Romo, A. Castañeda, J. Rodríguez & E. Barrado, “Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México,” *Hbio*, vol. 13, no. 2, pp. 95–102, 2003. Disponible en <https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/articled/view/1101>
- [16] J. M. Cogollo, “Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio,” *Dyna*, vol. 78, no. 165, pp. 18–27, 2011. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/articled/view/25636>
- [17] E. Silva, M. E. Villarreal, O. Cárdenas, C. A. Cristancho, C. Murillo, M.A. Salgado & G. Nava, “Inspección preliminar de algunas características de toxicidad en el agua potable domiciliar, Bogotá y Soacha, 2012,” *Bioméd*, vol. 35, no. 2, pp. 152–166, 2015. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2538>
- [18] R. Fernández-Maestre, “Aluminio: ingestión, absorción, excreción y toxicidad,” *Rev Costarr Salud Pública*, vol. 23, no. 2, pp. 113–118, 2014. Disponible en <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-753649?lang=es>
- [19] E. Tostado, “Neurotoxicidad de los metales pesados: Plomo, Mercurio y Aluminio,” *Tesis Máster*, Fac. Medicina, Univ. VLL., CDMX, 2014. Disponible en <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/7188/TFM-M149.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] Instituto Nacional de Salud - INS, “Sistema de información para la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano - SIVICAP,” *aplicacionespruebas.ins.gov.co*, [online], 2010. Disponible en http://aplicacionespruebas.ins.gov.co/sivicap_new/default.aspx
- [21] O. Ospina, C. García, V. Galeano, L. Gaviria & C. García, “Modelo de evaluación del recurso hídrico de la ciudad de Ibagué,” *Investigación*, UCC. Iba, Col, 2016.

- [22] República de Colombia. Minvivienda, “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico R.A.S. Bogotá, D.C., Colombia,” *Resolución 330*, DO, No. 50.267, 8 Jun. 2017. Disponible en <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>
- [23] República de Colombia. Minvivienda, “*Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO C. Sistemas de Potabilización*,” Bog., D.C. Col.: MinVivienda, 2010. Disponible en <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo-c-dic-4-2013.pdf>
- [24] Y. Andía, “Tratamiento de agua: coagulación-floculación,” *Reporte, Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico*. SEDAPAL, LIM., PE., Abr. 2000. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/andia.pdf>
- [25] N. Vera, “Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá al aeropuerto internacional de la ciudad de México,” *Tesis de pre-grado*, ESIA, IPN, CDMX, 2007. Recuperado de <http://www.elaguapotable.com/ALTERNATPOTAB.pdf>
- [26] C. Alvarado, H. Pérez & C. Saba, “Evaluación del uso del policloruro de aluminio en conjunto con sulfato de aluminio en el proceso de coagulación de una planta de potabilización de agua en el estado Carabobo,” *Ing Soc UC*, vol. 10, no. 1, pp. 35–46, 2015. Recuperado de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/IngenieriaYSociedad/a10n1/art03.pdf>
- [27] J. M. Cogollo, “Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio,” *DYNA*, vol. 78, no. 165, pp. 18–27, 2011. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>