



Revista EIA

ISSN 1794-1237

e-ISSN 2463-0950

Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.43

Enero - junio 2025

Reia4337 pp. 1-32

Publicación científica semestral

Universidad EIA, Envigado, Colombia

## PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Pérez-Vidal, A.; Gutiérrez-Zapata, H. M.; Delgado-Cabrera, L. G.; Vidal-Guerrero, A. J.; Ramírez-Medina, L. M.; Porras-Castro, C. F.; Escobar-Rivera, J. C.; Ospina-Rodríguez, J.; Gutiérrez-Marín, J. P. y Torres-Lozada, P. Influencia del Tipo de Alcalinizante Sobre el Proceso de Estabilización Química del Agua Tratada en Plantas de Tratamiento Convencional

Revista EIA, 22(43), Reia4337 pp. 1-32  
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1767>

✉ *Autor de correspondencia:* Correa Pérez-Vidal, A.  
Doctora en Ingeniería énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental  
Correo electrónico:  
[andrea.perez@correounivalle.edu.co](mailto:andrea.perez@correounivalle.edu.co)

**Recibido:** 28-02-2024

**Aceptado:** 10-12-2024

**Disponible online:** 01-01-2025

# Influencia del Tipo de Alcalinizante Sobre el Proceso de Estabilización Química del Agua Tratada en Plantas de Tratamiento Convencional

✉ ANDREA PÉREZ-VIDAL<sup>1</sup>

HÉCTOR MARIO GUTIÉRREZ-ZAPATA<sup>1</sup>

LUIS GERMÁN DELGADO-CABRERA<sup>1</sup>

ALEX JAVIER VIDAL-GUERRERO<sup>1</sup>

LINA MARÍA RAMÍREZ-MEDINA<sup>1</sup>

CHRISTIAN FELIPE PORRAS-CASTRO<sup>1</sup>

JUAN CARLOS ESCOBAR-RIVERA<sup>2</sup>

JULIANA OSPINA-RODRÍGUEZ<sup>2</sup>

JUAN PABLO GUTIERREZ-MARÍN<sup>2</sup>

PATRICIA TORRES-LOZADA<sup>1</sup>

1. Universidad del Valle, Colombia

2. Empresas Municipales de Cali EMCALI EICE ESP, Colombia

## Resumen

Los bajos niveles de alcalinidad en las fuentes de abastecimiento superficial, aunado al uso de coagulantes y desinfectantes en el tratamiento convencional del agua para consumo humano, que en general consumen alcalinidad y reducen el pH, hacen necesario realizar ajustes en la calidad del agua tratada con el fin de garantizar su estabilización química y prevenir contaminación secundaria en el sistema de distribución de agua potable (SDA) por problemas de corrosión o incrustaciones. En este estudio se revisó la literatura sobre características de diferentes alcalinizantes y posteriormente se evaluó mediante ensayos de pruebas de jarras la estabilización química del agua, previamente desinfectada, de una planta de tratamiento de agua potable – PTAP convencional abastecida con agua

cruda del río Cauca; se evaluaron dos condiciones de calidad de agua, previamente tratada y desinfectada, con pH inicial de 5,60 y 3,98 unidades respectivamente (asociadas a agua cruda con turbiedad de 30 y 200 UNT, respectivamente). Se evaluaron cinco alternativas: tres de alcalinización simple ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , NaOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y dos de doble alcalinización ( $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{NaOH}$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). En la doble alcalinización se dosificó  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasta alcanzar un pH cercano a 6,5-7,0 y posteriormente se adicionó NaOH o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . En todos los casos se evaluaron valores de pH entre 7,04-8,96, y finalmente se determinaron los índices de agresividad (IA) y de saturación de Langelier (ISL). Se identificaron diferentes alternativas de alcalinizantes, cada una con ventajas y limitaciones y cuya selección dependerá, además de sus características químicas y la calidad del agua, de aspectos como costos, facilidad de adquisición, preparación y dosificación, tipo de materiales del SDA, entre otros. La evaluación experimental mostró que, tanto  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como la doble alcalinización  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$ , resultan viables para la estabilización química del agua analizada, lográndose aumentar la alcalinidad y la capacidad amortiguadora del agua, que favorece que el pH sea más estable en el SDA. Se destaca que la eficacia del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dependerá del contenido de CaO (>90%) y de una adecuada homogenización de la solución durante su dosificación. El ajuste del pH debe ser del orden de 8,7 a 8,9 para reducir la tendencia corrosiva del agua y permitiendo alcanzar valores cercanos a 12 y 0 de los índices IA e ISL respectivamente.

**Palabras clave:** agua potable; ajuste de ph; alcalinidad; capacidad amortiguadora; carbonato de calcio; corrosión; estabilización química; hidróxido de calcio; sistema de distribución de agua potable; tratamiento de agua.

---

## Influence of the Type of Alkali on the Chemical Stabilization Process of Treated Water in Conventional Treatment Plants

### Abstract

The low levels of alkalinity in surface supply sources, combined with the use of coagulants and disinfectants in the conventional treatment of drinking water, which consume alkalinity and reduce the pH, force adjustments in the quality of the water treated with in order to guarantee its chemical stabilization and prevent secondary contamination in the drinking water distribution system (DWDS) due corrosion or scale problems. In this study, the characteristics of different alkalis were reviewed

in the literature, and the subsequently the chemical stabilization process was evaluated in jar test trials using water after disinfection, from a conventional drinking water treatment plant – WTP. Two disinfected-water quality conditions were evaluated, with initial pH of 5.60 and 3.98 units respectively (associated with raw water with turbidity of 30 and 200 NTU, respectively). Five alternatives were evaluated: three with simple alkalization ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) and two with double alkalization ( $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{NaOH}$  and  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). In double alkalization,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  was dosed until a pH close to 6.5-7.0 was reached, and then  $\text{NaOH}$  or  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  was subsequently added. In all cases, pH values between 7.04-8.96 were evaluated, and finally the aggressiveness indices (AI) and Langelier saturation indices (LSI) were determined. Different alkalizing alternatives were identified, each with advantages and limitations and whose selection will depend, in addition to its chemical characteristics and water quality, on aspects such as costs, ease of acquisition, preparation and dosage, type of DWDS materials, among others. The experimental evaluation showed that both  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and the double alkalization  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$  are viable for the chemical stabilization, achieving an increase in the alkalinity and buffering capacity of the water, which makes the pH be more stable in the DWDS. It is highlighted that the effectiveness of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  will depend on the CaO content (>90%) and adequate homogenization of the solution during dosing. The pH adjustment should be between 8.7 to 8.9, to reduce the corrosive tendency of the water and allowing values close to 12 and 0 of the IA and ISL indices respectively.

**Keywords:** drinking water; pH adjustment; alkalinity; buffer capacity; calcium carbonate; corrosion; chemical stabilization; calcium hydroxide; water distribution system; water treatment.

## 1. Introducción

Los recursos hídricos son el principal motor del crecimiento económico, industrial, agrícola y social de la población, y su cantidad, calidad y composición (propiedades físicas, químicas y microbiológicas) están determinadas tanto por su procedencia (superficial, subterránea, de precipitación, salina, etc.), como por los usos del suelo y tipo de actividades que se realizan alrededor de las cuencas de abastecimiento (residenciales, agrícolas, ganaderas, industriales, etc.) (Al-Harashsheh, et al. 2023; Pérez-Vidal, Torres-Lozada y Escobar-Rivera, 2016).

Las características de las fuentes de abastecimiento, así como otros aspectos (costos de tratamiento, acceso y disponibilidad de

insumos para el tratamiento, requerimientos de personal, equipos, etc.) definen el conjunto de operaciones y procesos de tratamiento más adecuados para modificar o ajustar la calidad física, química y microbiológica del agua, de tal forma que se garantice que sea apta para el consumo humano y no represente riesgo para la salud durante su distribución y consumo (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y Ministerio de Protección Social (MPS), 2007; World Health Organization (WHO), 2017).

El tratamiento convencional o de ciclo completo, basado en las etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y ajuste del pH, es una de las tecnologías tradicionalmente aplicadas a nivel mundial (Yateh, et al. 2024; Penalva, Sabogal y Daniel, 2013). El amplio uso de coagulantes convencionales como las sales metálicas hidrolizadas (Al o Fe) (Pivokonsky, et al. 2024) y desinfectantes como el cloro (predominio de especies  $OCl^-$  y  $HClO$ ) (Pan, et al. 2023) generan variaciones en las características fisicoquímicas del agua como la alcalinidad, el contenido de iones de calcio, cloruros y sulfatos, que reducen el pH e influyen en la estabilidad química del agua tratada y distribuida en el SDA (Loewenthal, Morrison y Wentzel, 2004; Casey, 2009).

Las aguas alcalinas tienden a ser incrustantes, ya que generan hidróxidos o fomentan la deposición de metales como el calcio (Saalidong, et al. 2022), el aluminio (He, et al. 2021) y el manganeso (Li, et al. 2019). Por otro lado, las aguas ácidas suelen ser corrosivas debido a la alta concentración de hidrogeniones (bajos niveles de pH), factor determinante en la solubilidad de los materiales metálicos o base de cemento del SDA y en la formación de depósitos derivados de subproductos de la corrosión (Salazar-Jiménez, 2015; American Water Works Association (AWWA), 2011). En el caso de la ocurrencia de fenómenos de incrustación de carbonato de calcio, el agua deposita calcio sobre los diferentes componentes del SDA, y en el caso de la corrosión, el agua disuelve el calcio y causa pérdida de materiales (Al-Harahsheh, et al. 2023; Kumar, Singh y Singh, 2023).

En general, ambos fenómenos generan un impacto en la infraestructura física, hidráulica y de calidad de agua del SDA, causando la ocurrencia de fugas, pérdida o reducción de la capacidad hidráulica, la continuidad del servicio, incremento

de los costos de funcionamiento de las empresas, afectación de las características organolépticas del agua, (De Souza, Correia y Colmenares, 2010; Crittenden, et al. 2023), además de la acumulación y posterior liberación compuestos inorgánicos al agua (Hill, et al. 2010), como metales pesados y microorganismos patógenos (Chang-Geng, et al. 2022), que pueden comprometer la salud de los usuarios (Hill, et al. 2010).

Particularizando en el problema de corrosión, una de las principales causas está asociada a la inadecuada estabilización química del agua tratada, que durante su paso por el SDA puede provocar cambios en la calidad del agua y daños en los materiales con los que entra en contacto (Pietrucha-Urbanik, et al. 2017). Sumado a ello, el uso de materiales en el SDA, susceptibles a la corrosión incrementa el riesgo de deterioro de la calidad del agua. Entre los materiales más comunes y estudiados se pueden citar los materiales metálicos como el hierro, cobre, acero y plomo, y los materiales a base de cemento (hormigón armado, fibrocemento y asbesto cemento), todos susceptibles a la corrosión uniforme (pérdida de material, relativamente uniforme a lo largo de toda la superficie), corrosión no uniforme (picaduras, tuberculaciones o incrustaciones de corrosión) y corrosión galvánica (dos metales diferentes entran en contacto) (Environmental Protection Agency (EPA), 2016).

Para evitar problemas de corrosión en el SDA y deterioro de los materiales se recomiendan, de forma general valores de alcalinidad  $> 50 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ , dureza total  $> 60 \text{ mg/L}$ , calcio  $> 20 \text{ mg/L}$ , cloruros  $< 50 \text{ mg/L}$ , sulfatos  $< 50 \text{ mg/L}$ , relación  $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-} < 0,50$  y Carbono inorgánico Disuelto (CID)  $5,0 - 10,0 \text{ mg C/L}$ ; en cuanto al pH está directamente ligado al material, para el hierro o acero se recomienda que el pH sea mayor a 6,8 unidades; sin embargo, para evitar liberación de cobre se recomienda que sea mayor a 7,8, para evitar disolución del cemento debe ser mayor a 8,5 y para evitar liberación de plomo debe ser mayor a 8,8 unidades (AWWA, 2011; Casey, 2009).

Como estrategias de control y seguimiento al problema de corrosión, se puede considerar: *i.* revisar y mejorar las condiciones de operación de la PTAP, desde el punto de vista del uso de coagulantes y desinfectantes, que son los que generan el principal consumo de alcalinidad y reducción del pH; *ii.* optimizar el proceso

de estabilización química del agua antes de su distribución al SDA mediante el ajuste de variables como el pH, alcalinidad, dureza, CID, temperatura y capacidad amortiguadora; *iii.* selección y uso de materiales adecuados en el SDA; *iv.* inspección física de los elementos del SDA y adecuado de un programa de monitoreo de calidad de agua que incluya la determinación de índices de estabilidad; *v.* programa periódico de mantenimiento y limpieza de redes (*flushing*) para el control del crecimiento y desprendimiento de biopelículas y acumulación de compuestos metálicos en las tuberías y, *vi.* evaluar la opción del uso de inhibidores de corrosión (Trujillo, Martínez y Flores, 2008; De Sousa, Colmenares y Correia, 2008; De Souza, Correia y Colmenares, 2010; AWWA, 2011; Crittenden, et al. 2023; Anshar, et al. 2023).

Cuando se trata de adecuar la calidad del agua para estabilizarla químicamente, el método más común, simple y económico es el ajuste del pH y la alcalinidad, destacándose la eliminación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por aireación o el uso de alcalinizantes como el  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o  $\text{NaHCO}_3$  o la doble alcalinización de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con  $\text{NaOH}$  o con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Withers, 2005; De Souza, Correia y Colmenares, 2010). Con la adición al agua de un álcali como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o  $\text{CaCO}_3$ , se estabiliza el pH ácido causante de corrosión y se promueve la formación de una capa protectora muy delgada de carbonato de calcio sobre las superficies de las tuberías y accesorios del SDA (De Souza, Correia y Colmenares, 2010; Crittenden, et al. 2023).

En general, las principales variables que han demostrado tener efectos sobre la estabilidad química del agua y se relacionan con el problema de corrosión en el SDA son: pH, alcalinidad, dureza cálcica, sólidos disueltos totales, cloruros, sulfatos, CID, carbonatos, bicarbonatos, oxígeno disuelto y temperatura (AWWA, 2011; Anshar, et al. 2023). Otras variables que también han evidenciado efectos sobre la corrosión son la materia orgánica natural, cloro residual, amoníaco, polifosfatos, silicatos, ortofosfatos, hierro, zinc, manganeso, cobre y aluminio (AWWA, 2011; Trueman, et al. 2017; Kumar, Singh y Singh, 2023).

Las aguas con suficiente CID serán menos propensas a las fluctuaciones del pH en el SDA, porque los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{=}$  presentes en el agua, incrementan su capacidad amortiguadora. La

mayor amortiguación se produce a pH 6,30 o por encima de pH 9,00 (AWWA, 2011); sin embargo, a valores de  $\text{pH} \leq 6,30$  se incrementa el riesgo de liberación de metales como el hierro, plomo, cadmio, cobre, etc., con demostrados efectos en la salud pública (Hill, et al. 2010) y en el rango de pH 8,00–8,50 con bajas concentraciones de CID ( $< 10 \text{ mg C/L}$ ) se tendrá un pH muy variable en el SDA (Health Canada, 2015). De allí, la importancia de realizar un adecuado ajuste del pH del agua tratada teniendo en consideración el tipo de materiales presentes en el SDA, además de hacer un monitoreo y seguimiento cuantitativo y cualitativo de la tendencia corrosiva del agua (Trujillo, Martínez y Flores, et al. 2008).

En esta investigación se identificaron las características de los alcalinizantes de mayor aplicación para el ajuste del pH como estrategia de estabilización química del agua en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y se evaluó a escala de laboratorio, el uso cinco alternativas de alcalinizante sobre el proceso de estabilización química del agua previamente desinfectada, de una PTAP de tratamiento convencional, abastecida por el río Cauca. Teniendo en cuenta que el agua potable es distribuida a un SDA en el que predominan materiales susceptibles a la corrosión, como el hierro y asbesto cemento (AC), se evaluaron el **índice de saturación de Langelier (ISL)** por su amplia aplicación (Wilczak, et al. 2010) y el índice de agresividad (IA) (Singley, 1981), ambos ampliamente empleados en múltiples investigaciones (Al-Harahsheh, et al. 2023; Gonzales, et al. 2022; Eslami, et al. 2022).

## 2. Materiales y Métodos

El estudio comprendió dos etapas, una de revisión de literatura sobre los tipos y características de los alcalinizantes más usados para la estabilización química y ajuste del pH en el tratamiento de agua potable, y una etapa experimental en que se evaluaron tres alternativas de alcalinización simple ( $\text{Ca(OH)}_2$ , NaOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y dos alternativas de doble alcalinización ( $\text{Ca(OH)}_2 + \text{NaOH}$  y  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ), previamente seleccionadas con base en el análisis de la revisión de literatura.



### Revisión de literatura

Se revisó información asociada a los productos químicos empleados para la estabilización química del agua, particularizando en aguas de baja alcalinidad y con tendencia corrosiva. Se identificaron sus características como aporte de alcalinidad y CID, ventajas y limitaciones. La búsqueda de información bibliográfica se realizó en dos bases de datos Web of Science y SCOPUS haciendo uso de las ecuaciones de búsqueda descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda bibliográfica	
Base de datos	Ecuación de búsqueda
	Se crearon 2 ecuaciones individuales. Para la ecuación de búsqueda final se conectaron dichas ecuaciones con el conector booleano AND (#1 AND #2).
Web of Science	<p>1. (((((((((((((AB=(water treatment)) AND AB=(drinking water)) OR ALL=(potable water))) NOT ALL=(wastewater)) NOT ALL=(dialysis)) NOT ALL=(waste)) NOT ALL=(renal)) NOT ALL=(Sludge)) NOT ALL=(clinical)) NOT ALL=(hypertension)) NOT ALL=(wetland)) NOT ALL=(anaerobic)</p> <p>2 (((((((((((((((((((((((((AB=(water stabiliz(s)ation)) AND AB=(water stability)) AND AB=(corrosion)) AND ALL=(langelier saturation index)) OR ALL=(ryznar stability index)) OR ALL=(Aggressive Index)) OR ALL=(buffer capacity)) OR ALL=(buffer intensity)) OR ALL=(alkali)) OR ALL=(alkalization)) AND ALL=(chemical stabiliz(s)ation)) OR ALL=(calcium carbonate)) OR AB=(pH control)) AND AB=(pH)) OR ALL=(acidity)) AND AB=(alkalinity)) AND AB=(CaCO3)) OR ALL=(Ca(OH)2)) AND ALL=(Na2CO3)) OR ALL=(lime)) OR ALL=(calcium hydroxide)) OR ALL=(sodium hydroxide)) OR ALL=(sodium bicarbonate)) OR ALL=(sodium carbonate)) OR ALL=(sodium silicate)</p>
SCOPUS	TITLE-ABS-KEY("water stabiliz(s)ation" OR "water stability" OR "corrosion" OR "langelier saturation index" OR "ryznar stability index" OR "Aggressive Index" OR "buffer capacity" OR "buffer intensity" OR "alkali" OR "alkalization" OR "chemical stabiliz(s)ation" OR "calcium carbonate" OR "pH control" AND "pH" OR "acidity" AND "alkalinity" AND "CaCO3" OR "Ca(OH)2" OR "Na2CO3" OR "lime" OR "calcium hydroxide" OR "sodium hydroxide" OR "sodium bicarbonate" OR "sodium carbonate" OR "Sodium silicate") AND TITLE-ABS-KEY("water treatment" OR "drinking water" OR "potable water")

El periodo de análisis de la información fue de 32 años comprendido entre los años 1991 a 2023. El análisis integrado de la información se realizó con los siguientes tipos de documentos: article, conference paper o proceeding paper, review article y data paper, identificándose 153 en SCOPUS y 249 en WoS. Los resultados de la búsqueda bibliográfica de cada base de datos fueron exportados en formato ris., y posteriormente integrados en el software Mendeley© Desktop versión 1.19.8 en el cual se descartaron 9 documentos duplicados, quedando 393 documentos (371 artículos,



25 conferencias y 1 documento de datos). Posteriormente, se realizó una revisión de título, autores y resumen de cada documento, lo que permitió filtrar la información a 330 documentos.

### *Etapa experimental*

Se evaluaron cinco alternativas de alcalinización para ajustar el pH y estabilizar el agua, previamente tratada en una PTAP convencional (coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección), abastecida por el río Cauca; en la planta se emplearon cloruro férrico -  $\text{FeCl}_3$  como coagulante y Cloro gaseoso -  $\text{Cl}_2$  como desinfectante. La toma de muestras de agua se realizó después de la desinfección, por lo tanto, para efectos de esta investigación, se denominará “agua desinfectada”.

Teniendo en cuenta la alta variabilidad del agua del río Cauca, en términos de turbiedad (Montoya, et al. 2011), el agua desinfectada usada para los ensayos, fue tomada en dos condiciones diferentes de calidad del agua cruda: 30 UTN (pH de agua desinfectada 5,60 unidades) y 200 UTN (pH de agua desinfectada 3,98 unidades).

Para las tres alternativas de alcalinización simple se evaluaron como alcalinizantes cal hidratada -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , hidróxido de sodio -  $\text{NaOH}$  y carbonato de sodio -  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Para las dos condiciones de doble alcalinización ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaOH}$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ) se aplicó primero  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasta alcanzar un pH ~6,5-7,0, posteriormente se adicionaba el segundo alcalinizante ( $\text{NaOH}$  o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) hasta el valor de pH deseado en cada condición experimental (pH en el rango de 7,04 a 8,96), asociado a valores que se encuentran en el rango recomendado en la reglamentación colombiana para agua potable (agua estabilizada) (MAVDT y MPS, 2007). La Tabla 2 sintetiza las condiciones experimentales en las que se evaluaron las diferentes alternativas de estabilización química del agua.

**Tabla 2.** Descripción de las condiciones experimentales evaluadas en los ensayos de estabilización

Tratamiento	Tipo de alcalinización	Concentración de la solución de alcalinizante	Rango de pH evaluado (unidades)	
			Condición N°1 -Turbiedad agua cruda: 30 UNT -pH agua desinfectada: 5,60	Condición N°2 -Turbiedad agua cruda: 200 UNT -pH agua desinfectada: 3,98
1	<b>Simple:</b> Ca(OH) <sub>2</sub>	1%*	7,09 – 8,93	7,24 – 8,73
2	<b>Simple:</b> NaOH	1%*	7,04 – 8,83	7,08 – 8,96
3	<b>Simple:</b> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,5%**	7,56 – 8,84	7,13 – 8,92
4	<b>Doble:</b> Ca(OH) <sub>2</sub> hasta pH ~ 6,5-7,0. Posteriormente se adicionaba solo NaOH	***	7,17 – 8,89	7,92 – 8,90
5	<b>Doble:</b> Ca(OH) <sub>2</sub> hasta pH ~ 6,5-7,0. Posteriormente se adicionaba solo Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	***	7,19 – 8,53	8,09 – 8,73

\*Concentración usada en planta; debido a la menor solubilidad del Ca(OH)<sub>2</sub>, la solución se mantenía constantemente homogenizada antes de su dosificación.

\*\* Esta concentración garantiza máxima solubilidad del reactivo (McCoy y Test, 1911; Waldeck, Lynn y Hill, 1932).

\*\*\* igual que las empleadas en la alcalinización simple

Cabe mencionar que la solución de Ca(OH)<sub>2</sub>, se mantenía constantemente homogenizada antes de su dosificación. Los ensayos se realizaron por duplicado en equipos de prueba de jarras (jarras cuadradas de 2L), en las cuales se adicionaba al agua desinfectada y posteriormente, los alcalinizantes en diferentes dosis que permitieran variar el pH en el rango previamente fijado. Para garantizar la homogenización de la mezcla se empleó una velocidad de 300 RPM durante 1 minuto.

Para evaluar el desempeño de los alcalinizantes, una vez terminados los ensayos se determinaron las variables de calidad en el agua estabilizada, necesarias para calcular los índices de saturación de Langelier (ISL) (SM 2330B) (American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF), 2017) y de agresividad (IA) (Singley, 1981), como son pH (SM 4500 H<sup>+</sup> B),

temperatura (SM 2550 B), conductividad (SM 2510 B), alcalinidad total (SM 2320 B), dureza cálcica (SM 3500 B) y sólidos disueltos totales (SM 2540 D); el calcio se determinó a partir de su relación estequiométrica con la dureza cálcica ( $20 \text{ mg Ca}^{+2} / 50 \text{ mg CaCO}_3$ ) y la concentración de bicarbonatos  $\text{HCO}_3^-$  se determinó a partir de los valores de pH y los equilibrios del sistema carbonato.

### *Análisis estadístico*

Se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) (Montgomery, 2012) considerando la turbiedad del agua cruda y el tipo de alcalinizante como factores clave, mientras que el pH se consideró como una covariable en el modelo estadístico estimado; se exploró cómo estos factores y covariable interactúan y afectan los indicadores de calidad del agua. Con base en estos resultados realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey (Walpole, Myers y Myers, 2012), para comparar cada par de alcalinizantes, diferenciando entre las dos condiciones de calidad de agua evaluadas, en términos de los índices IA e ISL. Para el análisis se empleó el software de uso libre R.

## **3. Resultados y Discusión**

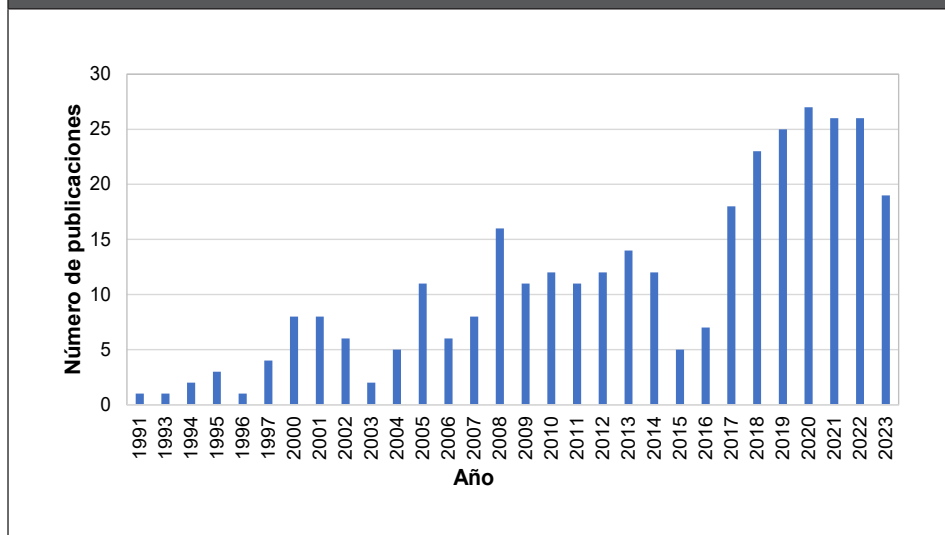
### *Revisión de literatura*

El análisis de literatura permitió identificar documentos científicos a partir de 1991 mostrando un constante incremento en el número de publicaciones por año (ver Figura 1), evidenciando el creciente interés y la importancia del tema para los investigadores en este campo. Estas publicaciones se concentraron principalmente en orden descendente en países como Estados Unidos, India, Irán, Canadá, Suiza, Arabia e Inglaterra.

Se identificaron diferentes productos que han sido empleados para ajustar el pH y la alcalinidad en el agua como estrategias para la estabilización química del agua, siendo los más usados el hidróxido de calcio –  $\text{Ca(OH)}_2$  (Meyer y Edwards, 1994; Moghbel, et al. 2009; McAliley, et al. 2012; Wang, et al. 2015; Kim, 2017), hidróxido de

sodio (NaOH) (Gagnon y Doubrough, 2011; Wang, et al. 2015) y carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Kim, et al. 2009; Shi, et al. 2018; Wang, et al. 2015).

Figura 1. Número de publicaciones asociadas al análisis bibliométrico (n = 330).



También se ha reportado el uso combinado de  $\text{CO}_2$  seguido de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Kim, et al. 2009; McAliley, et al. 2012; Shi, et al. 2018), resultando viable ya que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  elimina iones  $\text{H}^+$ , aporta calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y el  $\text{CO}_2$  aumenta la concentración de alcalinidad en términos de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) (Watten, et al. 2017); también se recomienda el uso del  $\text{CO}_2$  para el ajuste del pH de coagulación y reducir así el consumo de coagulantes a base de sales de Al o Fe (Moghbel, et al. 2009). La combinación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NaHCO}_3$ , con suficiente presencia de calcio también ha mostrado beneficios en el ajuste del pH (Kim, et al. 2008). El estudio realizado por Kim, et al. (2009) logró un adecuado control del potencial de precipitación de carbonato de calcio (PPCC), mediante el ajuste del pH del agua antes de la coagulación con  $\text{CO}_2$  seguido de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y al final del proceso antes de su distribución, con  $\text{CO}_2$  seguido de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Cabe destacar que entre los alcalinizantes mencionados, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se caracteriza por su bajo costo y uso ampliamente implementado a nivel mundial (Shi, et al. 2018); sin embargo, por su menor solubilidad comparada con los demás alcalinizantes, la eficacia dependerá de la constante homogenización de la solución

durante la dosificación y la calidad del producto (>93% de CaO y ausencia de metales pesados) (AWWA, 2011). Por su parte, el NaHCO<sub>3</sub> ha evidenciado que mejora el equilibrio carbonático en el agua (aporta carbono inorgánico disuelto – CID), aumenta la capacidad amortiguadora y reduce el potencial de liberación de metales como el hierro en el SDA (AWWA, 2011; Shi, et al. 2018; Wang, et al. 2015).

En general, para reducir la tendencia corrosiva del agua en el SDA, es recomendable mejorar químicamente la calidad del agua ajustando la alcalinidad en un rango de 40 mg CaCO<sub>3</sub> /L CaCO<sub>3</sub> (Baloïtcha, Mayabi y Home, 2022) hasta 140 mg CaCO<sub>3</sub> /L, para proporcionar suficiente capacidad amortiguadora y estabilidad del agua en el sistema de distribución (Boysen, et al. 2009). La Tabla 3 describe las principales características de los productos químicos comúnmente empleados y reportados para la estabilización química de aguas con baja alcalinidad y CID.

**Tabla 3.** Productos químicos (alcalinizantes) utilizados en los procesos de estabilización química del agua potable

Producto químico	Concentración grado comercial	Aporte de alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L) y/o CID (mg C/L) por mg/L de producto adicionado*	Ventajas para el control de la corrosión y en su manejo operativo	Precauciones o limitaciones
Hidróxido de sodio - NaOH (soda cáustica)	98,9% (NaOH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,25 mg CaCO<sub>3</sub>/L</li> <li>• No aporta CID</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agrega alcalinidad en forma de OH-</li> <li>• Fácil de dosificar.</li> <li>• Alta solubilidad y se incrementa con la temperatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere un control estricto de la dosis. Riesgo de sobredosis, principalmente en aguas con baja capacidad amortiguadora, muy blandas y con bajo nivel de CO<sub>2</sub> libre.</li> <li>• Se recomienda adicionar NaOH acompañado de CO<sub>2</sub>, para aguas blandas y de baja alcalinidad.</li> <li>• Aporta sodio al agua.</li> <li>• No aporta alcalinidad en forma de CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> a menos que haya CO<sub>2</sub> libre presente en el agua o sea añadido.</li> <li>• Producto químico peligroso, requiere cuidado en su uso y manipulación.</li> <li>• Las bajas temperaturas pueden provocar congelación o apelmazamiento (punto de congelación de la solución al 30% es 10°C)</li> </ul>

**Tabla 3.** Productos químicos (alcalinizantes) utilizados en los procesos de estabilización química del agua potable

Producto químico	Concentración grado comercial	Aporte de alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L) y/o CID (mg C/L) por mg/L de producto adicionado*	Ventajas para el control de la corrosión y en su manejo operativo	Precauciones o limitaciones
Hidróxido de calcio - Ca(OH) <sub>2</sub> (cal hidratada)	72-74% (CaO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,35 mg CaCO<sub>3</sub>/L</li> <li>• No aporta CID</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta el pH y el calcio en aguas blandas.</li> <li>• Producto químico relativamente económico.</li> <li>• La solubilidad es 1,9 g/L a 0 °C y disminuye ligeramente con la temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil control del pH en aguas con baja alcalinidad y capacidad de amortiguación.</li> <li>• Riesgo de sobredosis en aguas blandas con bajo nivel de CO<sub>2</sub> libre, por lo tanto, se recomienda adicionar cal acompañada de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• La calidad de la cal varía y puede contener contaminantes (metales pesados y alta concentración de aluminio). A menudo aumenta la turbiedad del agua tratada y puede obstruir los equipos de dosificación.</li> <li>• Se requiere de un tanque de sedimentación para evitar que las partículas de cal entren en el agua tratada. Se puede utilizar la filtración de lecho profundo después de la adición de cal.</li> <li>• Menos higroscópica y mucho más fácil de almacenar que la cal viva, pero la carbonatación puede causar deterioro.</li> <li>• Las bajas temperaturas pueden provocar congelación o apelmazamiento.</li> </ul>
Óxido de calcio - CaO (cal viva)	93-98% CaO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No aporta CID</li> </ul>	Igual que la cal hidratada	<p>Igual que la cal hidratada, además:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere apagador de cal para producir cal hidratada.</li> <li>• Es difícil de usar debido a su baja solubilidad y alta higroscopia, lo que aumenta los riesgos de apelmazamiento y obstrucciones.</li> <li>• Debe almacenarse en áreas a prueba de humedad y por periodos cortos (pocas semanas) para evitar absorber agua y CO<sub>2</sub> y formar una torta de carbonato de calcio.</li> </ul>
Carbonato de sodio - Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	>98%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,94 mg CaCO<sub>3</sub>/L</li> <li>• 0,11 mg C/L</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta alcalinidad, CID y pH (≥ 8,3).</li> <li>• Se disuelve fácilmente, no peligroso y relativamente fácil de manipular y dosificar</li> <li>• Solubilidad 71 g/L a 0°C y aumenta con la temperatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aporta sodio al agua (0,43 mg/L de Na por 1 mg/L de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).</li> <li>• Se debe evitar agregar más de 10 mg/L de Na</li> <li>• Se hidroliza absorbiendo agua del aire, lo que puede hacer que se apelmace. Los sacos no deben almacenarse más de 6 meses</li> <li>• El costo es mayor que el de la cal (aproximadamente 10 veces)</li> </ul>

**Tabla 3.** Productos químicos (alcalinizantes) utilizados en los procesos de estabilización química del agua potable

Producto químico	Concentración grado comercial	Aporte de alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L) y/o CID (mg C/L) por mg/L de producto adicionado*	Ventajas para el control de la corrosión y en su manejo operativo	Precauciones o limitaciones
Bicarbonato de sodio - NaHCO <sub>3</sub>	99%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,60 mg CacO3/L</li> <li>• 0,4 mg C/L</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta pH y alcalinidad en menor proporción que el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,</li> <li>• No peligroso; fácil de manipular.</li> <li>• Solubilidad 69 g/L a 0 °C y aumenta con temperatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se puede elevar el pH &gt; 8,3.</li> <li>• El costo es más alto que otros químicos, alrededor de 40 veces mayor que CaCO<sub>3</sub>.</li> </ul>
CO <sub>2</sub> + Ca(OH) <sub>2</sub>	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizado en PTAP convencional (agua blanda y de baja alcalinidad).</li> <li>• La selección de la secuencia y proporción correcta de los químicos puede controlar pH y las concentraciones de bicarbonato y calcio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El CO<sub>2</sub> debe añadirse antes que la cal.</li> <li>• Tener en cuenta lo mencionado previamente para el Ca(OH)<sub>2</sub></li> </ul>
Ca(OH) <sub>2</sub> + NaOH	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usado para aumentar el pH de ≈ 6,0 a 8,0, con aumento de alcalinidad de 5 a 17 mg/L CaCO<sub>3</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tener en cuenta lo mencionado previamente para el Ca(OH)<sub>2</sub> y el NaOH</li> </ul>

\* AWWA, 2011; Hart, 2008; Casey (2009). Adaptado de AWWA (2011) y EPA (2016)

Los componentes activos de los alcalinizantes se pueden separar en tres, los que aportan iones OH<sup>-</sup>, iones Ca<sup>2+</sup> o iones CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>; los primeros neutralizan la acidez presente en el agua, la cual es atribuida al ácido carbónico. Las especies que se forman de esta neutralización dependen del pH y si éste es menor a 8,3 se favorece la presencia de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y mayor de 8,3 se tiene presencia de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>; estos últimos neutralizan la acidez presente en el agua en menor medida que los OH<sup>-</sup>, pues al ser bases débiles permanecen en equilibrio con su ácido conjugado, siendo la reacción reversible, mientras que los OH<sup>-</sup> reaccionan completamente (Benjamin, 2015).

Existe variedad de productos alcalinizantes que pueden usarse solos o combinados para reducir los problemas de corrosión; sin embargo, su efectividad dependerá del tipo fuente de abastecimiento (superficial o subterránea) y su calidad química, ya que aguas con baja dureza y alcalinidad (< 50 mgCaCO<sub>3</sub>/L), ricas en cloruros y sulfatos (> 50 mg/L) y bajo oxígeno disuelto (< 4m/L), presentan tendencia corrosiva, lo que puede conllevar a la afectación de materiales metálicos en el SDA (Gray, 2008).



Los productos que aportan especies carbonato ( $\text{CO}_3$ ) incrementan el Carbono Orgánico Disuelto (CID) y a su vez la capacidad amortiguadora (también denominada capacidad o intensidad buffer) lo que brinda mayor estabilidad del pH en el SDA (AWWA, 2011), además de la formación de una capa protectora de  $\text{CaCO}_3$  (Crittenden, et al. 2023). Por lo tanto, la selección del alcalinizante para una adecuada estabilización química del agua, exige conocer las características del agua asociadas al sistema carbonato y las principales variables que influyen en su balance (pH, alcalinidad, dureza, temperatura, sólidos disueltos totales, CID, entre otras) (AWWA, 2011; Anshar, et al. 2023).

La inadecuada estabilización química del agua puede ocasionar problemas de incrustación (cuando el agua deposita minerales) y de corrosión (cuando el agua disuelve minerales) (Kumar, Singh y Singh, 2023) lo que conlleva al deterioro de la calidad del agua en el SDA por contaminación secundaria (Pietrucha-Urbanik, et al. 2017). Así mismo, la corrosión puede ocasionar problemas de agresión o disolución de materiales a base de cemento (Loewenthal, Morrison y Wentzel, 2004; Crittenden, et al. 2023), depósito de incrustaciones por corrosión (Chang-Geng, et al. 2022), cambios de coloración en el agua (Boxall, et al. 2023) y biocorrosión ocasionada por microorganismos (Zhong, et al. 2023).

Particularmente, el agua del río Cauca, a la altura de la captación en la ciudad de Cali, se caracteriza por ser un agua blanda, de baja alcalinidad ( $21,5 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ) y pH cercano a la neutralidad (7,1 – 7,5) (Bueno, et al. 2014), lo que sugiere que es un agua con tendencia corrosiva por tener alcalinidad y dureza menor a  $50 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$  (Gray, 2008; Hayes, 2012); lo que sumado a los procesos de tratamiento que involucran la adición de productos químicos (coagulación, precloración, cloración intermedia y postcloración) consumen alcalinidad y bajan aún más el pH, aumentando considerablemente la tendencia corrosiva del agua tratada (Gray, 2008; Pérez-Vidal, Torres-Lozada y Escobar-Rivera, 2020).

La selección de las cinco (5) alternativas de alcalinización evaluadas en este estudio, tuvo en consideración aspectos relacionados con la facilidad de acceso al producto y reporte de experiencias de uso a nivel mundial, además de la calidad del

agua tratada y los materiales presentes en el SDA, teniendo en consideración lo siguiente:

- Aporte de CID para mejorar la capacidad amortiguadora y reducir la variabilidad del pH en el SDA (Crittenden, et al. 2023)
- Aumento del pH a valores superiores de 8,5 para mitigar el riesgo de liberación de metales (Fe, Cu, Pb, Cr) presente en el SDA (AWWA, 2011; Tian, et al. 2022; Kumar, Singh y Singh, 2023) y agresión en materiales a base de cemento (tuberías de asbesto cemento, tanques de almacenamiento) (Crittenden, et al. 2023).

### *Etapa experimental*

La Tabla 4 describe las características del agua desinfectada empleada para los ensayos de estabilización química.

**Tabla 4.** Características del agua desinfectada empleada para los ensayos, asociadas a las dos condiciones de calidad de agua evaluadas

Variable	CALIDAD AGUA DESINFECTADA	
	Condición N°1 (Turbiedad agua cruda: 30 UNT)	Condición N°2 (Turbiedad agua cruda: 200 UNT)
pH (Unidades de pH)	5,60	3,98
Temperatura (°C)	24,20	22,70
Conductividad (µS/cm)	121,20	179,9
Oxígeno disuelto (mg/L O <sub>2</sub> )	5,78	6,05
Acidez (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	11,88	22,20
Alcalinidad total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	4,02	0,00
Dureza total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	39,96	43,29
Dureza cálcica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	22,20	22,20
Dureza magnésica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	17,76	21,09

Las características del agua del río Cauca (baja alcalinidad y dureza) (Bueno, et al. 2014; Hayes, 2012), sumada al uso de químicos que consumen alcalinidad y reducen el pH (coagulante a base de Fe y cloro gaseoso) (Loewenthal, Morrison y Wentzel,

2004; Casey, 2009), ocasionan que el agua tratada tenga una alta tendencia corrosiva (Bueno, et al. 2014; Pérez-Vidal, Torres-Lozada y Escobar-Rivera, 2020). Esta situación se agudiza durante los eventos extremos de turbiedad en el río (Montoya, et al. 2011), que obligan al incremento en las dosis de productos químicos durante el tratamiento, ya que en general, no se aplican estrategias de ajuste del pH antes de la coagulación como el uso de alcalinizante primario (Kim, et al. 2009). Por estas razones, el agua desinfectada empleada en los ensayos presentó características ácidas, siendo más marcada esta tendencia en la Condición 2, asociada al incremento de la turbiedad en el agua cruda.

De acuerdo con los valores de pH del agua desinfectada, las especies del equilibrio carbonato que pueden predominar en el agua son el ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) y en una mínima proporción los iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), con ausencia total de iones carbonato ( $\text{CO}_3^{=}$ ) (Casey, 2009; Barceló, et al. 2002), lo que le confiere al agua características ácidas con prácticamente ausencia de alcalinidad. Cabe mencionar que la capacidad amortiguadora está fuertemente influenciada por la presencia de  $\text{CO}_3^{=}$ , siendo recomendable en este caso alcanzar valores de pH superiores a 8,5, para mejorar esta condición (AWWA, 2011), lo cual podría lograrse con el uso de alcalinizantes que aporten carbonatos. La Tabla 5 y la Figura 1 muestran el efecto de los diversos alcalinizantes evaluados sobre el pH, la alcalinidad total y los índices de agresividad (IA) y de Saturación de Langelier (ISL).

**Tabla 5.** Dosis de alcalinizante adicionadas y características del agua estabilizada (pH, alcalinidad total e índices IA e ISL).

Tipo de alcalinización	Condición N°1 -Turbiedad agua cruda: 30 UNT -pH inicial del agua desinfectada: 5,60					Condición N°2 -Turbiedad agua cruda: 200 UNT -pH inicial del agua desinfectada: 3,98				
	Dosis (mg/L)	pH (Unidades)	AT (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	IA	ISL	Dosis (mg/L)	pH (Unidades)	AT (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	IA	ISL
	Simple: Ca(OH) <sub>2</sub>	7,63	7,09	11,06	9,59	-2,27	12,24	7,24	9,05	9,78
9,15		7,84	13,06	10,41	-1,45	13,31	7,44	11,06	10,09	-1,79
10,30		8,10	14,07	10,74	-1,14	13,84	7,90	12,06	10,59	-1,28
11,44		8,35	16,08	11,10	-0,80	14,90	8,32	14,07	11,09	-0,78
11,82		8,71	17,08	11,43	-0,41	15,97	8,45	16,08	11,30	-0,57
Simple: NaOH	12,20	8,93	<b>18,09</b>	<b>11,56</b>	<b>-0,16</b>	16,50	8,73	<b>17,08</b>	<b>11,62</b>	<b>-0,25</b>
	5,55	7,04	7,03	9,14	-2,74	9,53	7,08	8,04	9,33	-2,53
	6,60	7,13	9,04	9,38	-2,55	10,16	7,57	10,00	9,95	-1,94
	7,32	7,71	10,05	10,10	-1,91	11,43	7,67	11,06	10,09	-1,80
	8,80	8,15	11,06	10,48	-1,44	12,07	8,38	12,06	10,84	-1,05
Simple: Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8,99	8,32	12,06	10,69	-1,23	12,70	8,46	13,07	10,95	-0,94
	9,21	8,83	<b>13,06</b>	<b>11,56</b>	<b>-0,69</b>	13,65	8,96	<b>14,07</b>	<b>11,78</b>	<b>-0,41</b>
	18,00	7,56	19,59	10,38	-1,65	26,25	7,13	21,11	9,80	-2,06
	18,50	7,74	20,10	10,50	-1,47	30,00	7,43	23,11	10,14	-1,73
	22,50	8,22	23,61	11,16	-0,93	33,75	7,97	25,12	10,71	-1,15
Doble: Ca(OH) <sub>2</sub> hasta pH 6,5-7,0* Seguido de NaOH**	25,50	8,28	25,72	11,27	-0,83	35,25	8,27	28,14	11,06	-0,80
	28,50	8,61	30,15	11,83	-0,44	37,50	8,30	32,16	11,15	-0,79
	30,00	8,84	<b>41,20</b>	<b>11,88</b>	<b>-0,07</b>	41,25	8,92	<b>36,18</b>	<b>11,82</b>	<b>-0,05</b>
	0,26	7,17	10,05	9,55	-2,35	1,68	7,92	11,06	10,60	-1,25
	0,53	7,46	11,06	9,89	-2,03	1,74	8,20	12,06	10,89	-0,97
Doble: Ca(OH) <sub>2</sub> hasta pH 6,5-7,0* Seguido de solo Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> **	1,06	7,60	11,06	10,03	-1,90	1,85	8,31	14,07	11,07	-0,79
	1,58	8,04	13,06	10,54	-1,39	2,11	8,46	15,08	11,25	-0,61
	2,64	8,29	13,06	10,79	-1,15	3,17	8,70	16,08	11,52	-0,34
	3,14	8,89	<b>15,07</b>	<b>11,45</b>	<b>-0,47</b>	3,70	8,90	<b>17,08</b>	<b>11,75</b>	<b>-0,12</b>
	7,50	7,19	12,06	9,65	-2,28	6,00	8,09	13,06	10,82	-1,10
Doble: Ca(OH) <sub>2</sub> hasta pH 6,5-7,0* Seguido de solo Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> **	10,50	7,56	15,07	10,12	-1,82	9,00	8,32	14,07	11,08	-0,84
	12,75	7,81	18,09	10,45	-1,49	10,50	8,66	15,07	11,45	-0,46
	15,00	8,04	19,09	10,70	-1,24	12,00	8,70	16,08	11,51	-0,40
	15,75	8,43	20,10	11,12	-0,83	13,50	8,70	17,08	11,54	-0,38
	16,50	8,53	<b>20,10</b>	<b>11,22</b>	<b>-0,72</b>	15,00	8,73	<b>18,09</b>	<b>11,60</b>	<b>-0,32</b>

\*Las dosis de Ca(OH)<sub>2</sub> adicionada hasta alcanzar pH ≈ 6,5-7,0 unidades fue de 0,90 mg/L para la Condición N°1 y 13,84 mg/L para la Condición N°2.

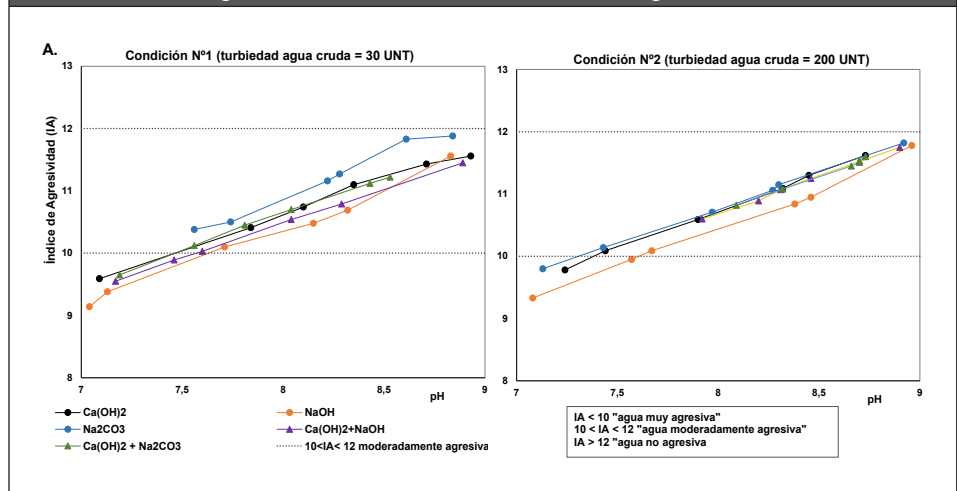
\*\*Para la doble alcalinización las dosis reportadas corresponden al NaOH y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> respectivamente

AT: alcalinidad total

IA: índice de agresividad. IA<10: agua muy agresiva; 10<IA<12: agua moderadamente agresiva; IA>12: agua no agresiva

ISL: índice de saturación de Langelier. ISL<0: agua insaturada (tiende a disolver CaCO<sub>3</sub>); ISL=0: agua saturada, CaCO<sub>3</sub> en equilibrio; ISL>1: agua sobresaturada (tiende a precipitar CaCO<sub>3</sub>)

**Figura 2.** Efecto de los alcalinizantes evaluados sobre los índices de estabilización. A. Índice de agresividad (IA). B. Índice de Saturación de Langelier (ISL).



Los resultados de la aplicación de los diferentes alcalinizantes evaluados muestran que las dosis requeridas para alcanzar un adecuado valor de pH en las dos condiciones de calidad de agua desinfectada estudiadas, dependen completamente de las características de la misma, que como se mencionó anteriormente, a su vez dependen de las características del agua cruda y de las condiciones de coagulación y desinfección.

En la alcalinización simple se observó que el requerimiento de dosis de los tres alcalinizantes fue mayor en la Condición N°2 (turbiedad del agua cruda: 200 UNT) debido a que se inició la estabilización química con un bajo valor de pH (3,98 unidades) y ausencia de alcalinidad. La dosis requerida para lograr el máximo valor de pH evaluado, mostró un incremento entre las Condiciones N°1 y N°2 del 26,1% para  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 63,6% para  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y 77,3% para NaOH.

En la doble alcalinización se observó para la Condición N°1, que el requerimiento inicial de alcalinizante ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para modificar el pH de 5,6 hasta ~6,5-7,0 unidades fue bajo (0,90 mg/L) en contraste con la Condición N°2 (13,84 mg/L) que implicó elevar el pH desde 3,98 hasta ~6,5-7.0 unidades, lo que representó un incremento del 93,5% en el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y por lo tanto una disminución en el requerimiento del segundo alcalinizante (NaOH o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), comparado con la alcalinización simple. Teniendo en

cuenta que  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es un producto de bajo costo comparado con los otros alcalinizantes (AWWA, 2011; Hart, 2008), en términos de requerimiento de dosis, resultó favorable su uso al inicio de la doble alcalinización.

Aunque es recomendable garantizar condiciones de neutralidad del pH ( $\approx 7,0$ ) para evitar problemas de corrosión (Anshar, et al. 2023), para las condiciones evaluadas se observó que los valores de los índices IA e ISL alcanzados con el primer ajuste del pH alrededor de 7,0 – 8,0 aproximadamente, indican que esta condición de estabilización no es suficiente, ya que el agua estabilizada es “muy agresiva” e “insaturada” con tendencia moderadamente corrosiva (Anshar, et al. 2023), lo que favorecería la ocurrencia de fenómenos de corrosión en el SDA con el consecuente deterioro de la calidad del agua y potenciales efectos en la salud pública (Eslami, et al. 2022). Solamente se lograron condiciones de agua “moderadamente agresiva ( $10 < \text{IA} < 12$ )” con valores del índice IA entre 11,22 y 11,88 para los máximos valores de pH alcanzados en ambas condiciones. En el caso del ISL, el comportamiento fue similar, logrando los valores más cercanos al equilibrio ( $\text{ISL} = 0$ ) también con los mayores valores de pH evaluados en el estudio, logrando valores de ISL entre -0,05 a 0,72, ubicando el agua en un rango de ISL adecuado (Anshar, et al. 2023).

En general, se observó que el alcalinizante que presentó el comportamiento más desfavorable en términos de los índices de estabilidad evaluados fue el NaOH; se resalta que este alcalinizante presenta desventajas por el riesgo de sobredosificación en aguas blandas y con baja capacidad amortiguadora (AWWA, 2011; EPA, 2016), como es el caso del agua evaluada, lo que puede conllevar al incumplimiento normativo en Colombia (6,5 – 9,0) (MAVDT y MPS, 2007).

En cuanto a la capacidad amortiguadora, que depende directamente del pH y la alcalinidad al estar influenciada por la presencia de iones bicarbonato y carbonato (AWWA, 2011), se observó que el uso de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tanto en la alcalinización simple como doble, fue el producto que aportó mayor alcalinidad durante la estabilización, para ambas condiciones de calidad de agua evaluadas. Teniendo en cuenta que a pH de 8,3 se tiene la menor concentración

de carbonatos (Barceló, et al. 2002), resulta recomendable que el ajuste del pH sea por encima de 8,5 para incrementar la capacidad amortiguadora en el agua tratada (AWWA, 2011). En el estudio se encontró que los mejores resultados se logran con valores de pH entre 8,7 – 8,9 unidades.

El análisis estadístico respalda los resultados obtenidos, evidenciando en primera instancia que hay diferencias estadísticas significativas entre la condición de calidad de agua (turbiedad el agua cruda) y el tipo de alcalinizante, los cuales influyen en la variación de los índices de Agresividad (IA) y de Saturación de Langelier (ISL); aunque el pH no mostró diferencias significativas como variable única, su interrelación con el tipo y dosis de alcalinizante sí genera diferencias significativas e influye en los índices (ver Tabla 6).

Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) entre los índices IA e ISL y factores como turbiedad del agua cruda, tipo de alcalinizante y pH

Índice	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma C	CME	Valor F	Valor -p
IA	Turbiedad	1	14,565	14,565	414,182	0,000
	Alcalinizante	4	39,841	0,996	283,228	0,000
	pH	1	0,001	0,001	0,038	0,846
	Turbiedad * alcalinizante	4	182,944	45,736	1300,550	0,000
	Alcalinizante * pH	4	47,294	11,823	336,211	0,000
ISL	Turbiedad	1	19,503	19,503	560,764	0,000
	Alcalinizante	4	39,912	0,998	286,895	0,000
	pH	1	0,030	0,030	0,873	0,355
	Turbiedad * alcalinizante	4	172,356	43,089	1238,922	0,000
	Alcalinizante * pH	4	43,978	10,994	316,119	0,000

Los valores promedio de los índices (IA e ISL) calculados para ambas condiciones de calidad de agua y por tipo de alcalinizante (ver Tabla 7), evidenciaron que para la Condición N°1 los mejores resultados en la reducción de la tendencia corrosiva del agua se lograron en orden descendente con el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , seguido del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (garantizando la constante homogenización de la solución) y la doble alcalinización con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , ratificando que el comportamiento más desfavorable se obtuvo con el NaOH. Para la Condición N°2 el mejor resultado se logró con la doble alcalinización de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .



**Tabla 7.** Variación promedio de los índices de estabilidad (IA e ISL) para los diferentes alcalinizantes evaluados y bajo las dos Condición de calidad de agua.

Tipo de alcalinización	Promedio IA	Promedio ISL
<b>Condición N°1: turbiedad del agua cruda = 30 UNT</b>		
Simple: Ca(OH) <sub>2</sub>	10,805	-1,038
Simple: NaOH	10,225	-1,760
Simple: Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	11,170	-0,898
Doble: Ca(OH) <sub>2</sub> + NaOH	10,375	-1,548
Doble: Ca(OH) <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10,543	-1,397
<b>Condición N°2: turbiedad del agua cruda = 200 UNT</b>		
Simple: Ca(OH) <sub>2</sub>	10,745	-1,128
Simple: NaOH	10,490	-1,445
Simple: Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10,780	-1,097
Doble: Ca(OH) <sub>2</sub> + NaOH	11,180	-0,680
Doble: Ca(OH) <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	11,333	-0,583

El análisis comparativo con la prueba múltiple de Tukey entre diferentes alcalinizantes y en función de los índices de alcalinidad (ver Tabla 8), mostraron que existen diferencias estadísticas significativas entre todos los tipos de alcalinizantes evaluados para ambas condiciones de calidad de agua cruda (30 y 200 UNT), con excepción del Ca(OH)<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> que no mostraron diferencias significativas, solo para la Condición N°1 (30 UNT); siendo destacable, que en términos de costos, Ca(OH)<sub>2</sub> (siempre y cuando se realice una adecuada homogenización de la solución) podría resultar más económico que el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (AWWA, 2011; Shi, et al. 2018).

**Tabla 8.** Prueba de comparación múltiple de Tukey para los índices IA e ISL

Comparación de alcalinizantes	Índice de agresividad IA					Índice de Saturación de Langelier ISL				
	Estimador	SE	gl	razón-t	Valor-p	Estimador	SE	gl	razón-t	Valor-p
<b>Condición N°1: Turbiedad agua cruda = 30 UNT</b>										
Ca(OH) <sub>2</sub> y Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,7999	0,119	44	6,710	<0,0001	0,898	0,119	44	7,573	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> y Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH	-19,778	0,304	44	-6,505	<0,0001	-1,863	0,302	44	-6,161	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> y Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-0,0172	0,110	44	-0,156	0,9999	0,206	0,110	44	1,877	0,3447
Ca(OH) <sub>2</sub> y NaOH	-41,209	0,438	44	-9,402	<0,0001	-3,597	0,436	44	-8,251	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH	-27,776	0,308	44	-9,032	<0,0001	-2,760	0,306	44	-9,026	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-0,8171	0,120	44	-6,826	<0,0001	-0,692	0,119	44	-5,810	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y NaOH	-49,208	0,441	44	-11,165	<0,0001	-4,494	0,438	44	-10,254	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH y Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	19,605	0,304	44	6,444	<0,0001	2,069	0,303	44	6,838	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH y NaOH	-21,431	0,522	44	-4,106	0,0015	-1,734	0,519	44	-3,340	0,0140
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y NaOH	-41,037	0,438	44	-9,360	<0,0001	-3,803	0,436	44	-8,721	<0,0001
<b>Condición N°2: Turbiedad agua cruda = 200 UNT</b>										
Ca(OH) <sub>2</sub> y Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-34,332	0,235	44	-14,597	<0,0001	-3,416	0,234	44	-14,605	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> y Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH	-60,077	0,476	44	-12,632	<0,0001	-6,006	0,473	44	-12,699	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> y Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20,577	0,372	44	5,535	<0,0001	1,925	0,370	44	5,205	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> y NaOH	-0,8185	0,172	44	-4,762	0,0002	-0,831	0,171	44	-4,862	0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH	-25,746	0,487	44	-5,287	<0,0001	-2,590	0,484	44	-5,348	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	54,908	0,386	44	14,215	<0,0001	5,341	0,384	44	13,903	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y NaOH	26,147	0,201	44	12,989	<0,0001	2,585	0,200	44	12,913	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH y Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	80,654	0,566	44	14,256	<0,0001	7,931	0,563	44	14,096	<0,0001
Ca(OH) <sub>2</sub> +NaOH y NaOH	51,892	0,460	44	11,287	<0,0001	5,175	0,457	44	11,318	<0,0001
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y NaOH	-28,762	0,351	44	-8,187	<0,0001	-2,756	0,349	44	-7,887	<0,0001

A manera de síntesis, el análisis estadístico ratificó que para aguas de baja turbiedad (Condición N°1), los alcalinizantes Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Ca(OH)<sub>2</sub> mostraron la mayor reducción de las características corrosivas a pH superiores a 8,70, sin presentar diferencias estadísticas significativas entre ellos; sin embargo, el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> requirió dosis más altas que implican costos operativos superiores. Aunque Ca(OH)<sub>2</sub> puede ser más rentable y alcanza valores de índices de estabilidad similares a los alcanzados con el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, la aplicación de una solución homogénea resulta obligatorio para lograr este propósito. También resultó viable la doble alcalinización de Ca(OH)<sub>2</sub>

y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , mientras el  $\text{NaOH}$  fue el alcalinizante de resultados menos favorables en términos de los índices IA e ISL.

Para aguas de alta turbiedad (Condición N°2), la doble alcalinización con  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  presentó menores características corrosivas en términos de los índices IA e ISL, además se destaca que al aportar mayor alcalinidad, se incrementa la capacidad amortiguadora, lo que favorece a la estabilidad del pH en el SDA. Cabe mencionar que la efectividad del uso de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dependerá de la calidad del producto en términos del porcentaje del ingrediente activo ( $\text{CaO}$ ), el cual se espera que sea elevado ( $> 90\%$ ) y presente un bajo contenido de inertes, además de garantizar homogeneidad en la dosificación del producto, de lo contrario su efectividad se reducirá y además podría ocasionar problemas como incremento de la turbiedad del agua tratada, ineficiencia en el proceso de estabilidad química y obstrucción de la infraestructura empleada para su dosificación (AWWA, 2011; EPA, 2016).

#### 4. Conclusiones

- La selección de un alcalinizante para lograr un adecuado proceso de estabilización química dependerá de las características del agua, particularmente las asociadas al sistema carbonato (pH, alcalinidad, dureza, carbono inorgánico disuelto - CID), además de tener en consideración el tipo de materiales presentes en el SDA susceptibles a problemas de corrosión, entre otros aspectos. Independiente del alcalinizante empleado, es indispensable garantizar suficiente capacidad amortiguadora al agua con el fin de evitar variación del pH en el agua durante su paso por el SDA.
- La calidad del agua cruda, en términos de turbiedad, influye en el proceso de estabilización química, ya que, durante el tratamiento del agua, particularmente en los procesos previos de coagulación y desinfección, ocurre consumo de alcalinidad y disminución del pH, lo que incrementa la tendencia corrosiva del agua y, por tanto, ocasiona mayor consumo de alcalinizante cuando se incrementa la turbiedad.

- Para las condiciones de calidad de agua evaluadas en el estudio, se encontró que el ajuste del pH a valores cercanos a 7,0 no son adecuados ya que no garantiza suficiente alcalinidad que reduzca la tendencia agresiva y/o corrosiva del agua; con valores de pH entre 8,7 a 8,9 unidades si se logró reducir considerablemente la tendencia corrosiva del agua, lo que se reflejó en valores de los índices de agresividad (IA) y de saturación de Langelier (ISL), cercanos a 12 y 0 respectivamente, además de darse cumplimiento con la reglamentación Colombiana.
- Los alcalinizantes que presentaron mejores resultados en términos de los índices de estabilidad fueron el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la doble alcalinización con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasta pH 6,5 seguido de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Sin embargo, la efectividad del uso de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dependerá de la calidad del producto en términos del porcentaje del ingrediente activo (CaO), el cual se espera que sea elevado (> 93%) y presente un bajo contenido de inertes, además de garantizar homogeneidad en la dosificación del producto. Adicionalmente, se destaca que el uso de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  incrementó notoriamente la alcalinidad total del agua estabilizada, lo que favorece su capacidad amortiguadora.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a las Empresas Municipales de Cali EMCALI EICE ESP y la Universidad del Valle por la financiación de la investigación bajo el CONVENIO No. 300 – CECMA-01468 – 2023 y Contrato EMCALI-106-DOS-P-IF-0012.

## Referencias

- Al-Harashsheh, A.; Al-Tarawneh, A.; Al-Ma'abreh, A.; Ramadeen, S.; El-Hasan, T.; Al-Alawi, M.M. (2023). Assessing of drinking water quality in Al-karak province in central Jordan; based on water saturation indices. *Heliyon*, 9(8), E18862 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18862>
- Anshar, A.M.; Musa, B.; Ayaz, M.; Kasim, S.; Raya, I.; Ramírez-Coronel, A.A.; Chowdhury, S.; Zabibah, R.S.; Romero-Parra, R.M.; Barboza-Arenas, L.A.; Mustafa, Y.F.; Al-Khafaji, A.H.D. (2023). A critical review on corrosion and fouling of water in water distribution networks and their control. *Acta Chimica Slovenica*, 70(2), pp. 173-183 <https://doi.org/10.17344/acsi.2022.7939>
- American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater, 23ed. <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>
- American Water Works Association (AWWA). (2011). Manual of Water Supply Practices-M58, Internal Corrosion Control in Water Distribution Systems, Denver - Estados Unidos, AWWA, pp. 31-90.
- Casey, T. J. (2009). Drinking water stabilization and corrosion control. Aquavarra Research R&D Publications. Water Engineering Papers. Paper 2, Irlanda, pp. 4-8. <http://www.aquavarra.ie/publications.html>
- Baloïtcha, G.; Mayabi, A.; Home P. (2022). Evaluation of water quality and potential scaling of corrosion in the water supply using water quality and stability indices: A case study of Juja water distribution network, Kenya. *Heliyon*, 8(3), e09141 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09141>
- Barceló, I.D.; Allende, I.; Solís, H.E.; Bussy, A.L.; González, C. (2002). Determinación del estado de equilibrio de un sistema hídrico. *Revista de la Sociedad Química de México*, 46(2), pp. 93-104.
- Benjamin, M.M. (2015). Water chemistry, 2ed., University of Washington, Waveland Press, Inc., pp. 249-252.
- Boysen, R.E.; Mohammadesmaeili, F.; Ghiu, S.M.; McCandless, R.R. (2009). AWWA Membrane Technology Conference and Exposition (Memphis, Estados Unidos): Reverse osmosis product water stabilization alternatives and considerations. 15- 18 de Marzo, 17p, Elsevier, American Membrane Technology Association.
- Boxall, J.; Blokker, M.; Schaap, P.; Speight, V.; Husband, S. (2023). Managing discolouration in drinking water distribution systems by integrating understanding of material behaviour. *Water Research*, 243, 120416. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120416>

- Bueno, K.; Torres Lozada, P.; Delgado-Cabrera, L. G. (2014). Monitoreo y medición del ajuste del pH del agua tratada del Río Cauca mediante índices de estabilización. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17, pp. 563-575. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n2.2014.422>
- Chang-Geng, L.; Liu, C.; Xu, W.H.; Shan, M.G.; Wu, H.X. (2022). Formation mechanisms and supervisory prediction of scaling in water supply pipelines: A review. *Water Research*, 222, 118922 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118922>.
- Crittenden, J.; Trussell, R.; Hand, D.; Howe, K.; Tchobanoglous, G.; Ward, B.; Borchardt, J. (2023). *Stantec's water treatment: principles and design*, 3ed, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., pp. 1699-1804.
- De Sousa, C., Correia, A., & Colmenares, M. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 50, pp. 187-196.
- De Sousa, C., Colmenares, M.C., Correia, A. (2008). Contaminación bacteriológica en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 48(1), pp.17-26.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2016). *Optimal Corrosion Control Treatment Evaluation Technical Recommendations for Primacy Agencies and Public Water Systems*, pp. 23-25.
- Eslami, H.; Heidari, F A.; Salari, M.; Esmaeili, A.; Hosseini, A. N.; Dolatabadi, M. (2022). Investigation of corrosion and scaling potential in drinking water in Rafsanjan, Iran. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 7 (2), pp. 1623-1631 <https://doi.org/10.18502/jehsd.v7i2.9786>
- Gagnon, G.; Doubrough, J. (2011). Lead release from premise plumbing: A profile of sample collection and pilot studies from a small system. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(7), pp. 741-750 <https://doi.org/10.1139/l11-044>
- González, P P., Bautista-Capetillo, C. Ruiz-Canales, A. González-Trinidad, J. Júnez-Ferreira, H E. Rodríguez, A R C. Roveló, C O R. (2022). Characterization of scale deposits in a drinking water network in a semi-arid region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3257 <https://doi.org/10.3390/ijerph19063257>.
- Gray, N. (2008). *Drinking Water Quality: Problems and Solutions*, 2ed, Nueva York, Estados Unidos, Cambridge University Press, pp. 286-404.
- Hart, V. (2008). Alkalinity Addition Utilizing Carbon Dioxide & Lime: Inexpensive Solution to a Historically Expensive Problem. *Florida Water Resources Journal*, pp. 17-19.
- He, Y.; Pan, L.; Chen, R.; Shi, B. (2021). Field studies of aluminum release and deposition in drinking water distribution systems. *Chemosphere*, 275, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130067>

- Health Canada. (2015). Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - pH, Ontario, Canada, Minister of Health, pp. 8-11.
- Hill, A.; Friedman, M.; Reiver, S.H.; Korshin, G.; Valentine, R.L. (2010). Behavior of trace inorganic contaminants in drinking water distribution systems. *Journal AWWA*, 102(7), pp. 107-118 <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2010.tb10153.x>
- Hayes, C. (2012). Internal corrosion control of water supply systems: code of practice, Londres, International Water Association (IWA), pp.14-15.
- Kim, Y. (2017). Implications of the corrosion index for the quality of flowing tap water and the effects of added alkalinity on corrosion control. *Water and Environment Journal*, 31(3), pp. 425-431 <https://doi.org/10.1111/wej.12260>
- Kim D.H.; Kim, D.Y.; Hong, S.H.; Kim, J.W.; Kim, C.W. (2008). Development and implementation of a corrosion control algorithm based on calcium carbonate precipitation potential (CCPP) in a drinking water distribution system. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 57(7), pp. 531-539 <https://doi.org/10.2166/aqua.2008.047>
- Kim, D.H.; Cha, J.H.; Hong, S.H.; Kim, D.Y.; Kim, C.W. (2009). Control of corrosive water in advanced water treatment plant by manipulating calcium carbonate precipitation potential. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 26(1), pp. 90-101 <https://doi.org/10.1007/s11814-009-0015-z>
- Kumar, S.; Singh, R.; Singh, N. (2023). 2022 OPJU International Technology Conference on Emerging Technologies for Sustainable Development (OTCON) (Raigarh, Chhattisgarh, India): Seasonal variation of corrosion rate in the water distribution network. pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/OTCON56053.2023.10113975>
- Li, G.; Ma, X.; Chen, R.; Yu, Y.; Tao, H.; Shi, B. (2019). Field studies of manganese deposition and release in drinking water distribution systems: Insight into deposit control. *Water Research*, 163, 1-9 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114897>
- Loewenthal, R. E.; Morrison, I.; Wentzel, M. C. (2004). Control of corrosion and aggression in drinking water systems. *Water Science and Technology*, 49(2), pp. 9-18.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT); Ministerio de Protección Social (MPS). (2007). Resolución 2115 de 2007. 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. República de Colombia.
- McAliley, I.; Reiber, S.; D'Adamo, P.; Price, K C. (2012). Water Quality Technology Conference and Exposition 2012 (Toronto, Canada): Corrosion control strategies for low alkalinity waters, 4 – 7 Noviembre, Code 101248. ISBN: 978-162276787-8



- McCoy, H. N.; Test, C. D. (1911). Equilibrium between sodium carbonate, sodium bicarbonate and water [Second paper]. *Journal of the American Chemical Society*, 33(4), 473-476 <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ja02217a004>
- Meyer, T.; Edwards, M. (1994). National Conference on Environmental Engineering (Colorado, Estados Unidos): Effect of alkalinity on copper corrosion, 11-13 de Julio, pp. 9-16. 07311516 (ISSN); 0784400318 (ISBN).
- Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiments, 8ed, Arizona – Estados Unidos, Wiley, 2013, pp. 65-225.
- Moghbel, K.; Moghbel, K.; Leung, G.; Leung, G.; Sebastiani, E.; Boozarpour, M. (2009). Water Quality Technology Conference and Exposition 2009: Coagulation and filtration of San Francisco's low alkalinity/high pH water, 434p. 978-161567959-1 (ISBN)
- Montoya, C.; Loaiza, D., Torres, P.; Cruz, C.H; Escobar, J.C. (2011). Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA*, 8(16), 137-148.
- Pan, R.; Zhang, T.Y.; He, H.; Zheng, Z.X.; Dong, Z.Y.; Zhao, H.X.; Xu, M.Y.; Luo, Z.N.; Hu, C.Y.; Tang, Y.L.; Gamal, M.; Xu, B. (2023). Mixed chlorine/chloramines in disinfected water and drinking water distribution systems (DWDSs): A critical review. *Water Research*, 247, 120736 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120736>
- Penalva, M.A.; Sabogal, L.P.; Daniel, L.A. (2013). Tratamento de água para consumo humano. Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão, Rio de Janeiro, Elsevier, pp. 405-453.
- Pietrucha-Urbanik, K.; Tchórzewska-Cieślak, B.; Papciak, D.; Skrzypczak, I. (2017). Analysis of chemical stability of tap water in terms of required level of technological safety. *Archives of Environmental Protection*, 43(4), pp. 3-12 <https://doi.org/10.1515/aep-2017-0043>
- Pérez-Vidal A.; Torres-Lozada, P.; Escobar-Rivera, J.C. (2016). Hazard identification in watersheds based on water safety plan approach: case study of Cali-Colombia. *Environmental Engineering Management*, 15(4), pp. 861-872 <https://doi.org/10.30638/EEMJ.2013.093>
- Pérez-Vidal, A.; Escobar-Rivera, J. C.; Torres-Lozada, P. (2020). Development and implementation of a Water-Safety Plan for drinking-water supply system of Cali, Colombia. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 224, 113422 <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113422>
- Pivokonsky, M.; Novotna, K.; Petricek, R.; Cermakova, L.; Prokopova, M.; Naceradska, J. (2024). Fundamental chemical aspects of coagulation in drinking water treatment – Back to basics. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104660 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104660>

- Saalidong, B. M.; Aram, S. A.; Otu, S.; Lartey, P. O. (2022). Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground and surface water systems. *PLoS ONE*, 17(11), 1-17 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262117>
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136 <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
- Singley, J. (1981). The search for a corrosion index. *Journal AWWA*, 73(11), 579-582 <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1981.tb04802.x>
- Shi, B.; Wan, Y.J.; Yu, Y.; Gu, J.N.; Wang, G.L. (2018). Evaluating the chemical stability in drinking water distribution system by corrosivity and precipitation potential. *Water science and technology-water supply*, 18 (2), 383-390 <https://doi.org/10.2166/ws.2017.125>
- Tian, Y.; Yu, T.; Shen, J.; Zheng, G.; Li, H.; Zhao, W. (2022). Cr release after Cr (III) and Cr (VI) enrichment from different layers of cast iron corrosion scales in drinking water distribution systems: the impact of pH, temperature, sulfate, and chloride. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, pp.18778-18792 <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15754-w>
- Trujillo, E.; Martínez, V.; Flores, N.S. (2008). Ajuste del equilibrio químico del agua potable con tendencia corrosiva por dióxido de carbono. *Información Tecnológica*, 19(6), pp. 89-101 <https://doi.org/10.4067/S0718-07642008000600010>
- Trueman, B.F.; Sweet, G.A.; Harding, M.D.; Estabrook, H.; Bishop, D.P.; Gagnon, G.A. (2017). Galvanic corrosion of lead by iron (oxyhydr) oxides: potential impacts on drinking water quality. *Environmental Science & Technology*, 51(12), pp. 6812-6820 <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01671>
- Waldeck, W.F.; Lynn, G.; Hill, A.E. (1932). Aqueous solubility of salts at high temperatures. I. Solubility of sodium carbonate from 50 to 348°. *Journal of the American Chemical Society*, 54(3), pp. 928-936 <https://doi.org/10.1021/ja01342a012>
- Walpole, R.E.; Myers, R.H.; Myers, S.L.; Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, 9ed, Naucalpan de Juárez, Estado de México, Pearson, p.526-528.
- Wang, G.; Lu, Z.; Shi, B.; Wan, Y.; Sun, H.; Gu, J.; Wang, D. (2015). Effects of different alkaline chemical dosing on iron release in drinking water distribution systems. *Research of Environmental Sciences*, 28(1), pp.134-140 <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2015.01.18>
- Watten, B.; Mudrak, V.; Echevarria, C.; Sibrell, P.L.; Summerfelt, S.T.; Boyd, C.E. (2017). Performance and application of a fluidized bed limestone reactor designed for control of alkalinity, hardness and pH at the Warm Springs Regional Fisheries Center. *Aquacultural Engineering*, 77, pp. 97-106 <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.03.003>

- Wilczak, A.; Hokanson, D.R.; Trussell, R.R.; Boozarpour, M.; Degraça, A.F. (2010). Water conditioning for LCR compliance and control of metals release in San Francisco's Water System. *American Water Works Association*, 102(3), pp. 52-64 <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2010.tb10072.x>
- Withers, A. (2005). Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants. *Desalination*, 179, (1-3), pp. 11-24 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.11.051>
- World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for drinking water quality. Fourth edition incorporating the first and second addenda, Geneva, WHO, pp. 1- 33.
- Yateh, M.; Li, F.; Tang, Y.; Li, C.; Xu, B. (2024). Energy consumption and carbon emissions management in drinking water treatment plants: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140688 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140688>
- Zhong, H.; Tang, Y.; Yan, H.; Zhang, Y.; Dong, L.; Wang, B. (2023). Corrosion of pipelines in urban water systems: Current research status and future trends based on bibliometric analysis, *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104288 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104288>