

# **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DEL pH DEL AGUA TRATADA DEL RÍO CAUCA**

## **TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**KAREN ALEJANDRA BUENO ZABALA**

Ingeniera Sanitaria

Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental – ECCA

### **Directoras:**

**PATRICIA TORRES LOZADA**

Ingeniera Sanitaria, Ph.D.

Profesora Titular – Universidad del Valle

**LUZ EDITH BARBA HO**

Química, MSc.

Profesora Titular – Universidad del Valle

### **Asesores:**

**CAMILO HERNÁN CRUZ VÉLEZ**

Ingeniero Sanitario, MSc.

Profesor Asociado – Universidad del Valle

**LUIS GERMÁN DELGADO CABRERA**

Ingeniero Sanitario

Universidad del Valle



**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
POSGRADO EN INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**Aceptación del trabajo:**

---

---

---

---

**Ing. PATRICIA TORRES LOZADA, Ph.D.**

Directora de Tesis

**Qca. LUZ EDITH BARBA HO, M.Sc.**

Directora de Tesis

**Ing. ANDREA PÉREZ VIDAL, Ph.D.**

Jurado

**Ing. LUIS DARÍO SÁNCHEZ, M.Sc.**

Jurado

Santiago de Cali, Mayo de 2014

## *DEDICATORIA*

*A Dios porque en su infinita gloria me permitió  
alcanzar este gran logro en mi vida.*

*A mi hijo Ángel Ricardo Bedoya Bueno por ser mi  
motivación día a día.*

*A mi madre Olivia Zabala Quiñones, mi padre Asbel  
Bueno Vargas, mi hermana Lucy Carolina Bueno  
Zabala y el resto de mi familia por su comprensión,  
apoyo continuo y palabras de aliento.*

*Kaleja.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la profesora Patricia Torres Lozada por su gran apoyo continuo, dedicación y comprensión como profesional y amiga.*

*A la profesora Luz Edith Barba Ho por sus conocimientos, sugerencias y dedicación.*

*Al profesor Camilo Hernán Cruz Vélez por su aporte en conocimientos y experiencia en plantas de potabilización.*

*Al Ingeniero Luis Germán Delgado por todo el conocimiento aportado, su incondicional apoyo como profesional y amistad.*

*Al profesor Wilmar Alexander Torres López por su completa dedicación, disposición y asesoría en la estadística.*

*A las estudiantes de pregrado Yurani Cruz y Natalia López, a cada uno de los monitores en especial a Thomas Yeferson Coral Mena y Jefferson Steven Ropero Moreno, que por su colaboración pude culminar las fases experimentales de mi trabajo de grado.*

*A mis amigos y amigas: Cristian David Cárdenas, Claudia Patricia Amézquita, Diego Fernando Bedoya, Andrés Felipe Torres, Brayan Alexis Parra, Johnatan Gutierrez, Iris Tatiana Cruz Renjifo y todos los demás, por brindarme su sincero apoyo y felicidad a mis días.*

*A la Universidad del Valle y Colciencias por permitir formarme como investigadora y apoyarme financieramente para el desarrollo del trabajo de grado.*

*A EMCALI ESP EICE - Ing. Juan Carlos Escobar (Planta Puerto Mallarino) por apoyar la investigación, brindarnos el espacio para la fase experimental y el suministro de la base de datos histórica de la planta de Puerto Mallarino.*

*A los evaluadores Andrea Pérez Vidal, PhD y Luis Darío Sánchez, M.Sc, por su disposición y valiosos aportes.*

*Al Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental - ECCA y el Programa de Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental - PISA.*

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	10
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	11
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
3.1 Procesos de tratamiento .....	13
3.2 Estabilización de pH .....	14
3.3 Métodos de monitoreo y medición para el control del proceso de la estabilización del pH.....	17
3.4 Índices .....	19
3.4.1 Experiencias en la aplicación de índices .....	20
3.5 Alcalinizantes.....	21
3.5.1 Neutralización con una base.....	21
3.5.2 Neutralización con un carbonato alcalino .....	22
3.5.3 Experiencias con los diferentes alcalinizantes .....	23
4. OBJETIVOS.....	26
4.1 Objetivo general.....	26
4.2 Objetivos específicos .....	26
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
5.1 Identificación de los índices de mayor aplicabilidad para el control del proceso de estabilización del pH.....	27
5.2 Determinación de los índices potencialmente aplicables para el control del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca .....	28
5.2.1 Identificación del efecto de la adición de los químicos (coagulante, polímero, adsorbente, desinfectante y estabilizador de pH) usados en los procesos de tratamiento para potabilización .....	28
5.2.2 Determinación de los índices de mayor aplicabilidad.....	29
5.2.3 Identificación de opciones para controlar y evaluar el proceso de estabilización del pH .....	29
5.3 Evaluación a escala laboratorio de la estabilización del pH del agua tratada del río Cauca con diferentes alcalinizantes. ....	29
5.3.1 Análisis comparativo de la aplicación de los diversos alcalinizantes de pH .....	29
5.3.2 Evaluación de diferentes alcalinizantes.....	30
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
6.1 Identificación de los índices de mayor aplicabilidad para el control del proceso de estabilización del pH.....	35
6.2 Determinación de los índices potencialmente aplicables para el control del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca .....	40
6.2.1 Identificación del efecto de la adición de los químicos (coagulante, polímero, adsorbente, desinfectante y estabilizador de pH) usados en los procesos de tratamiento para potabilización .....	40
6.2.2 Determinación de los índices de mayor aplicabilidad.....	42
6.2.3 Identificación de opciones para controlar y evaluar el proceso de estabilización del pH .....	45
6.3 Evaluación a escala laboratorio de la estabilización del pH del agua tratada del río Cauca con diferentes alcalinizantes. ....	46
6.3.1 Análisis comparativo de la aplicación de los diversos alcalinizantes de pH .....	46

6.3.2 Evaluación de diferentes alcalinizantes.....	51
7. CONCLUSIONES .....	58
8. RECOMENDACIONES .....	60
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
10. ANEXOS.....	71
ANEXO 1. Cálculo del aporte de alcalinidad total (mgCaCO <sub>3</sub> /L) por cada mg/L de alcalinizante aplicado.....	71
ANEXO 2. Datos sin procesar de los ensayos de alcalinizantes .....	73
ANEXO 3. Resultados del diseño experimental.....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características de los métodos directos .....	18
<b>Tabla 2.</b> Características de los métodos indirectos.....	19
<b>Tabla 3.</b> Variables de ensayo .....	31
<b>Tabla 4.</b> Resumen de las características de los índices que proporcionan información de la tendencia de deposición de la película de carbonato de calcio.....	35
<b>Tabla 5.</b> Resumen de las características de los índices que dependen de la influencia del material y los métodos aplicados en la evaluación de la estabilización del pH .....	38
<b>Tabla 6.</b> Resumen de las características de los índices que son aplicados directamente en el SDA .....	39
<b>Tabla 7.</b> Resumen de las características de los modelos cuantitativos aplicados en la evaluación de la estabilización del pH .....	40
<b>Tabla 8.</b> Resumen estadístico de indicadores de tendencia central para las variables del proceso de estabilización del pH y determinación de índices. ....	43
<b>Tabla 9.</b> Comportamiento de Índices de estabilización para el agua tratada del río Cauca. ....	44
<b>Tabla 10.</b> Aspectos técnicos, de salud y económicos de los alcalinizantes utilizados para la estabilización del pH .....	47
<b>Tabla 11.</b> Condiciones de operación y resultados para la estabilización del pH con diferentes alcalinizantes.....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Principales tecnologías de tratamiento de agua para consumo humano .....	13
<b>Figura 2.</b> Diagrama de distribución de las especies químicas del CO <sub>2</sub> a 10°C .....	15
<b>Figura 3.</b> Índices cualitativos.....	27
<b>Figura 4.</b> Índices cuantitativos.....	28
<b>Figura 5.</b> Ensayo de dosis para diferentes alcalinizantes .....	31
<b>Figura 6.</b> Comportamiento de turbiedad del río Cauca, dosis de químicos y su efecto en la alcalinidad y pH durante los procesos de potabilización. Datos históricos horarios año 2012 .....	41
<b>Figura 7.</b> Comportamiento de la alcalinidad total y el pH a diferentes concentraciones de solución de alcalinizantes evaluados .....	52
<b>Figura 8.</b> Efecto de diferentes alcalinizantes sobre alcalinidad total y pH para las dosis evaluadas .....	52
<b>Figura 9.</b> Concentraciones de Sodio obtenidas para los alcalinizantes hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de sodio.....	53
<b>Figura 10.</b> Índices de estabilización del pH con diferentes alcalinizantes .....	55

## RESUMEN

En los procesos de tratamiento para la potabilización se utilizan productos químicos que consumen alcalinidad, generando una reducción del pH que hace necesario realizar el ajuste o estabilización del pH del agua tratada desde la planta de tratamiento mediante la adición de un alcalinizante, permitiendo la formación de una película controlada de carbonato de calcio –  $\text{CaCO}_3$ , que disminuye los problemas asociados a la distribución del agua como corrosión, agresividad e incrustación.

Dentro de las técnicas de evaluación del proceso de estabilización del pH, los índices son el método más económico y sencillo de realizar desde las plantas de potabilización, permitiendo predecir el comportamiento del agua en el Sistema de Distribución del Agua – SDA; sin embargo, al no existir un solo índice aplicable universalmente, es necesario conocer las aplicaciones y limitaciones de cada uno para su correcta aplicación. Uno de los métodos de control del proceso de estabilización del pH más empleados de la película sólida de carbonato de calcio en el SDA la cual es generada a partir de los iones carbonato y el calcio provenientes del agua, adicionando alcalinizantes que modifican la calidad química del agua; la selección del alcalinizante más adecuado depende de aspectos técnicos, económicos y de salud ocupacional.

Esta investigación tuvo como propósito evaluar el proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca mediante tres etapas: identificación de los índices y métodos de mayor aplicabilidad para el control del proceso, la determinación de los índices y la evaluación a escala de laboratorio con cal hidratada, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de sodio. En la primera etapa se realizó una revisión conceptual de cada uno de los índices y métodos de mayor aplicación reportados en la literatura, clasificándose en 2 tipos (cualitativos y cuantitativos). Los cualitativos se agruparon en: 1) Tendencia a precipitación de carbonato de calcio (Índice Saturación de Langelier–ISL, Índice de Fuerza de Conducción de Mc Cauley–IFC, Potencial de Precipitación de Carbonato de Calcio–PPCC) siendo útiles inicialmente para proporcionar las condiciones de sobresaturación; 2) Tipo de tubería (Índice de Agresividad–IA, Índice Relación de Larson–RL, Índice de Estabilidad de Ryznar–IER) aplicados en materiales de asbesto cemento – AC, hierro y acero; 3) Aplicación directa en el SDA (Índice Relación de Larson Modificado – RLM, Índice de Corrosión de Riddick – ICR) que consideran variables como tiempo de retención hidráulico, dióxido de carbono –  $\text{CO}_2$ , sodio, nitratos, oxígeno disuelto – OD y silicatos; los modelos cuantitativos fueron los Diagramas de Caldwell-Lawrence modificados y el Método de Mojmir Mach, que utilizan gráficos que determinan el equilibrio de saturación del  $\text{CaCO}_3$  y la agresividad del agua, requiriendo de software especializado para su aplicación.

En la segunda etapa se recopiló y procesó la información histórica del agua tratada del Río Cauca para el periodo 2010 – 2012 y se realizaron seis jornadas de muestreo y caracterización de las variables fisicoquímicas que influyen en el proceso de estabilización del pH y permiten la determinación de los índices seleccionados a partir del análisis de la etapa anterior (ISL, IFC, PPCC, IA, RL e IER), encontrándose que dado que no existen un índice universal, es recomendable utilizar al menos un índice que proporcione información sobre la tendencia de precipitación de carbonato de calcio y otro que represente el

comportamiento del agua cuando entra en contacto con el tipo de material de tubería predominante en el SDA; además de continuar promoviendo la renovación de tuberías en el SDA de la ciudad de Cali por PVC, ya que es un material altamente resistente a agentes químicos y propicio para asegurar la calidad del agua potable en la distribución, mientras que el AC y el hierro favorecen los procesos de lixiviación de metales.

En la tercera etapa se identificaron los tipos de alcalinizantes utilizados para el proceso de estabilización del pH, los cuales incluyen la neutralización con una base fuerte (cal hidratada y soda cáustica) y la neutralización con una sal ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$ ). Se realizó un análisis comparativo de la aplicación de los diversos alcalinizantes en términos de aspectos técnicos, económicos y de salud ocupacional mostrando las ventajas y limitaciones de cada uno, concluyendo que todos los alcalinizantes tienen potencial de ser usados para el proceso de estabilización del pH y su selección depende de aspectos como la calidad del agua cruda, tipo de procesos de tratamiento empleados previamente, la disponibilidad en el sitio, costos, complejidad, etc. De acuerdo con lo anterior, en la evaluación a escala de laboratorio se evaluaron cal hidratada, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de sodio con concentraciones de aplicación al 1% y 4%.

Los resultados de esta etapa permitieron identificar que para aguas con baja alcalinidad como las del río Cauca, la cal hidratada y el hidróxido de sodio con dosis de aplicación entre 6 – 8mg/L y 8 – 10mg/L, respectivamente, generan aguas con tendencia a precipitar la película de carbonato de calcio y condiciones de agua no agresiva para las tuberías de asbesto cemento en el SDA de la ciudad de Santiago de Cali, de acuerdo a los índices ISL, IFC, PPCC e IA. Las principales variables operacionales del proceso de estabilización para el agua tratada del río Cauca como pH deben permanecer entre 8.8 – 9.4 unidades; sin embargo, dichos alcalinizantes no logran obtener valores de alcalinidad total adecuados que brinden mayor capacidad para neutralizar ácidos y evitar la disminución del pH en el SDA. Aunque el carbonato de sodio y bicarbonato de sodio no exceden la concentración de sodio máxima permitida, este último no se recomienda para el agua tratada del río Cauca pues al mantenerse en  $\text{pH} < 8.0$  unidades, no permite obtener resultados adecuados para la estabilización del pH. Dosis de carbonato de sodio superiores a 130mg/L generan resultados adecuados en términos de los índices ISL, IFC, PPCC, IA e RL, manteniendo las variables de pH entre 8.6 – 9.0 unidades y alcalinidad total entre 85-125mg $\text{CaCO}_3$ /L.

El análisis estadístico permitió identificar que los índices de estabilización ISL, IFC, PPCC, IER, IA y RL, no presentan diferencias significativas con la aplicación de concentración de solución al 1% o 4% para la cal hidratada y el hidróxido de sodio; mientras que para el bicarbonato de sodio y carbonato de sodio, no existen diferencias significativas para la concentración de solución al 1%, pero sí para el 4%, presentando mejores resultados el carbonato de sodio.

De acuerdo con los resultados de esta investigación, es recomendable utilizar varios índices para realizar un mejor control del proceso de estabilización, los cuales incluyan aspectos relacionados tanto con el ajuste del pH como con el tipo de material de la tubería; adicionalmente, se deben mejorar las condiciones de estabilización del pH manteniéndolo en concentraciones iguales o superiores al pH de saturación (pHs: 8.7 – 9.0 unidades) y a la alcalinidad de equilibrio ( $\text{Alk}_{\text{eq}}$ : 27.3 – 36.7 mg $\text{CaCO}_3$ /L), lo que indica la necesidad de



revisar la normatividad colombiana vigente sobre agua potable ya que, aunque el agua del río Cauca tratada en las plantas de tratamiento de Puerto Mallarino y Rio Cauca cumple con la misma en términos de pH y alcalinidad total, los índices aplicados clasifican esta agua como insaturada con tendencia a la corrosión en el sistema de distribución. Es recomendable continuar evaluando otras alternativas que proporcionen valores adecuados de alcalinidad total y pH como incrementar la alcalinidad desde la fuente de abastecimiento, cambiar el tipo de coagulante o aplicar coagulación mejorada, evaluar diversos materiales filtrantes que incluyan carbonato de calcio, mezcla de alcalinizantes o bases fuertes con adición de dióxido de carbono.

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad química del agua de las fuentes de abastecimiento para el suministro municipal depende de varias condiciones, como climáticas, usos del suelo, actividades antrópicas, etc., lo que las hace diferentes una de otra; en casi todos los países del mundo en mayor o menor grado predominan aguas con sales no disueltas, baja alcalinidad y pH (Loewenthal et al. 2004). La mayoría de las fuentes requieren en alguna forma tratamiento para su distribución en los sistemas de agua potable (SDA); a lo largo de la historia, se ha buscado ofrecer las mejores características para el consumidor, reduciendo agentes patógenos y controlando los contaminantes químicos por medio de una serie de operaciones y procesos unitarios como el tratamiento convencional que involucra la coagulación, la floculación, la sedimentación, la filtración, la desinfección y la estabilización del pH (Di Bernardo & Sabogal, 2008; WHO, 2011).

Los niveles de alcalinidad de las fuentes de abastecimiento y la adición de productos químicos que se requieren en los procesos de potabilización influyen principalmente en el comportamiento del pH, el cual afecta la calidad del agua potable y los costos en el mantenimiento del sistema de distribución de agua (SDA), debido a que valores extremos pueden ocasionar agresividad, corrosión o incrustación en las tuberías, los cuales se reflejan en la lixiviación de metales, formación de biopelícula, reducción del diámetro de la red, entre otros (Schock, 2002; Jiménez & Rose, 2009). Por lo anterior, la mayoría de las aguas requieren como último proceso de potabilización, la estabilización del pH antes de su distribución al sistema de abastecimiento, brindando condiciones apropiadas que presenten un impacto mínimo y un mayor tiempo de vida útil (Sander et al. 1996; Schock, 2002). A nivel nacional, no se encuentran reportes documentados respecto a la importancia del proceso de estabilización del pH; aunque se evidencian comúnmente desde la operación y mantenimiento de los SDA principalmente debido a la corrosión que genera mayores daños. Por lo tanto, este proceso de estabilización es una medida de control fundamental que asegura la calidad del agua en el SDA hasta llegar al usuario final.

El río Cauca es de vital importancia para la ciudad de Santiago de Cali, ya que su agua tratada en las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y Río Cauca, abastece aproximadamente al 80% de su población (PDA, 2008). Valores históricos promedio de la calidad del río en el tramo Salvajina – Juanchito, evidencian su baja alcalinidad total, la cual oscila entre 16 y 29 mgCaCO<sub>3</sub>/L siendo clasificada como corrosiva por tener concentraciones <50 mgCaCO<sub>3</sub>/L (Gray, 2008), lo que aunado al uso de productos químicos dentro de los procesos de potabilización que consumen alcalinidad y reducen el pH, más los daños que se presentan en el SDA para las tuberías para asbesto cemento (AC) debido a las características del agua agresiva de datos históricos (2000-2010) del índice de agresividad (Pérez, 2013) reportando 1.48 daños por km de tubería (representan el 34.77% del material de la red) (PDA, 2008), hacen indispensable el control y optimización del proceso de estabilización del pH del agua antes de su ingreso al SDA, lo que está acorde con las tendencias actuales respecto al aseguramiento de la calidad del agua potable hasta el consumidor. En este trabajo de grado se evaluó el proceso de estabilización del pH en el agua tratada del río Cauca mediante la identificación, preselección y cálculo de índices, y el uso de diferentes alcalinizantes para el ajuste del pH.

## 2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En el tratamiento del agua para potabilización, se emplean procesos que implican la adición de productos químicos; dentro de estos procesos usualmente empleados se encuentran la coagulación y la desinfección. En el caso de la coagulación, el coagulante se diluye en el agua y la reacción de hidrólisis genera iones de hidrógeno que reducen la alcalinidad total dependiendo del tipo de coagulante a utilizar ( $0.93 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$  por  $\text{mg/L}$  de cloruro férrico o  $0.51 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$  por  $\text{mg/L}$  de sulfato de aluminio), presentando una disminución del pH (Edzwald, 2011); la desinfección es el último paso del acondicionamiento para generar agua potable, en el cual se promueve la reducción de microorganismos patógenos, mediante el uso de productos químicos como el cloro (WHO, 2011), cuyas propiedades ácido-base al hidrolizar, forma el ácido hipocloroso que se disocia en iones de hidrógeno, dando lugar a una pérdida de alcalinidad y reducción del pH (Trejo & García, 2007; Edzwald, 2011).

Posterior a estos procesos químicos, la estabilización del pH del agua tratada es el último proceso en el tratamiento del agua potable, el cual no debe generar aguas que sean ni demasiado ácidas (lo que puede generar corrosión en las tuberías metálicas de distribución y las internas del hogar), ni demasiado alcalinas (lo que dará lugar a la deposición de sales en el sistema de distribución de agua – SDA, causando una reducción en la sección del flujo) (Barid, 2004; De Moel et al. 2013); estas situaciones generan impactos económicos, hidráulicos, de estética y salud pública, incluyendo las fugas de agua, el aumento de costos de bombeo y el deterioro de la calidad en los SDA (Volk et al. 2000; Gray, 2008).

Las fuentes de agua que presentan concentraciones de dureza y alcalinidad total alrededor de  $50 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$  tienden a ser corrosivas, mientras que las aguas con dureza y alcalinidad alrededor de  $200 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$  generan incrustaciones (Salvato et al. 2003; Gray, 2008). Las aguas incrustantes acumulan depósitos en las líneas de distribución, calderas y otros equipos, así como en los filtros de grava y arena (Trujillo et al. 2003). En el caso de las tuberías, estas aguas reducen la sección útil o incluso pueden llegar a destruirlas por completo debido a características de alta dureza (Spellman & Drinan, 2000).

El agua corrosiva favorece el incremento de las concentraciones de metales debido a las reacciones del agua que generan disolución del material de la tubería, lixiviando metales como plomo y cadmio, los cuales son potencialmente tóxicos (Jiménez & Rose, 2009; Shams, 2009) y el cobre, hierro y zinc, que generan tinción de los accesorios y/o sabor metálico en el agua (Schock, 2002; Branán, 2011). La corrosión interna de las tuberías causa roturas y fugas en el SDA, requiriendo el reemplazo de la red y aumentando el riesgo microbiológico por la intrusión de microorganismos patógenos (virus, bacterias, protozoos y huevos de helmintos) que causan enfermedades como la fiebre tifoidea, hepatitis A o E, diarrea o gastroenteritis (causada por la infección de *salmonella*, *giardia* y *criptosporidium*) entre otras, que afectan principalmente a niños menores de 5 años (De Sousa et al. 2008, 2010; WHO, 2011).

Los productos de la corrosión en los SDA también pueden favorecer el crecimiento de biopelículas, ya que proporcionan la formación de este hábitat cuando las células microbianas se adhieren a las superficies de las tuberías y se multiplican. El crecimiento bacteriano en los SDA produce un deterioro del índice de riesgo de calidad del agua (IRCA), modificando su sabor y olor, además, de reducir la capacidad hidráulica, acelerar

su corrosión y hacer más difícil el mantenimiento de una concentración residual de desinfectante (Volk et al. 2000; McNeill & Edwards, 2001; De Sousa et al. 2008) o incluso tener que crear puntos de reclaración en la red, aumentando el riesgo de la formación de subproductos de cloración, tales como los trihalometanos – THM's (GQ, 2006).

Existen varios métodos de control de corrosión e incrustación en los SDA, tales como diseñar y seleccionar adecuadamente los materiales del sistema de distribución, emplear tuberías con revestimientos (Alquitrán, esmaltes, pintura epoxi, etc.), modificar la calidad del agua (estabilización química por medio de la cal, soda cáustica NaOH, bicarbonato de sodio, entre otros) y/o usar inhibidores (ortofosfatos, polifosfatos, mezcla de fosfatos y silicatos de sodio) (Godínez et al. 2003; Gray, 2008; Shams, 2009; Rahman & Gagnon, 2014). La mayoría de estos métodos representan grandes costos, por lo que estabilizar el agua desde la planta de tratamiento mediante el ajuste del pH y la alcalinidad es el más común, simple y económico (Trujillo et al. 2003; Trujillo et al. 2008; Health Canada, 2009; De Sousa et al. 2010), el cual permite que las tuberías mantengan una película de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) minimizando los problemas de corrosión e incrustación (Droste, 1997; Jiménez & Rose, 2009).

Como técnica de evaluación del proceso de estabilización del pH, se ha propuesto el uso de índices que estiman o predicen las posibles consecuencias en los SDA definiendo las características de la calidad del agua a la salida de la planta de potabilización como corrosivas, agresivas o incrustantes (Kim et al. 2008). Los diversos índices son de tipo cualitativo o cuantitativo (De Sousa et al. 2008, 2010; Trujillo et al. 2008; Health Canada, 2009); dentro de los cualitativos se han empleado los índices de saturación de Langelier, de estabilidad de Ryznar, de corrosión de Riddick y de fuerza de conducción de Mc Cauley, siendo los dos primeros los más utilizados (Barceló et al. 2002; Varó Galván et al. 2004; APHA et al. 2005). Otros índices como el método de Mojmir Mach y Diagramas de Caldwell-Lawrence, permiten determinar la agresividad del agua de manera cuantitativa los cuales, al tener un mayor sustento teórico, proveen mejores resultados que los modelos cualitativos (Hamrouni & Dhahbi, 2003; Trujillo et al. 2003; Trujillo et al. 2006; Trujillo et al. 2008).

La cuenca del río Cauca es considerada la principal fuente de abastecimiento de la ciudad de Cali ya que abastece el 80% de la población. Actualmente, el tratamiento de potabilización de esta fuente presenta inconvenientes con el producto aplicado (Cal viva que posteriormente se hidrata –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (Lozano, 2006), ya que presentan insolubilidad (Torres et al. 2008) y genera incremento de la turbiedad en el agua tratada (Di Bernardo & Sabogal, 2008). Los problemas evidenciados en el SDA como la formación de biopelículas, concentraciones de hierro y manganeso en las paredes internas de las tuberías y válvulas (Muñoz et al. 2007) y los datos históricos entre el 2000 – 2010 del índice de agresividad que evidencian características del agua tratada como “moderadamente agresivas”, pueden exponer el SDA a potenciales riesgos relacionados con la corrosión, lo que hace de este proceso una de las fases críticas del tratamiento de potabilización (Pérez, 2013). Lo anterior, hace indispensable el control y optimización del proceso de estabilización química del agua tratada del río Cauca antes de su ingreso al SDA, mediante la identificación, preselección y cculo de diferentes índices que evalúen la calidad del agua en términos de estabilización del carbonato de calcio, agresividad y corrosión teniendo en cuenta el material utilizado en el SDA, además del uso de diferentes alcalinizantes.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Procesos de tratamiento

Entre los principales aspectos a tener en cuenta para la selección de las tecnologías de potabilización, se encuentran las características de la fuente de abastecimiento que delimitan el conjunto de operaciones y procesos de tratamiento que al final se deben cumplir con el objetivo de producir agua potable de acuerdo con la reglamentación establecida en cada país. Las principales tecnologías de tratamiento de agua en nuestro medio, pueden ser resumidas en dos grandes grupos: sin o con coagulación química (Di Bernardo & Sabogal, 2008) como se observa en la Figura 1.

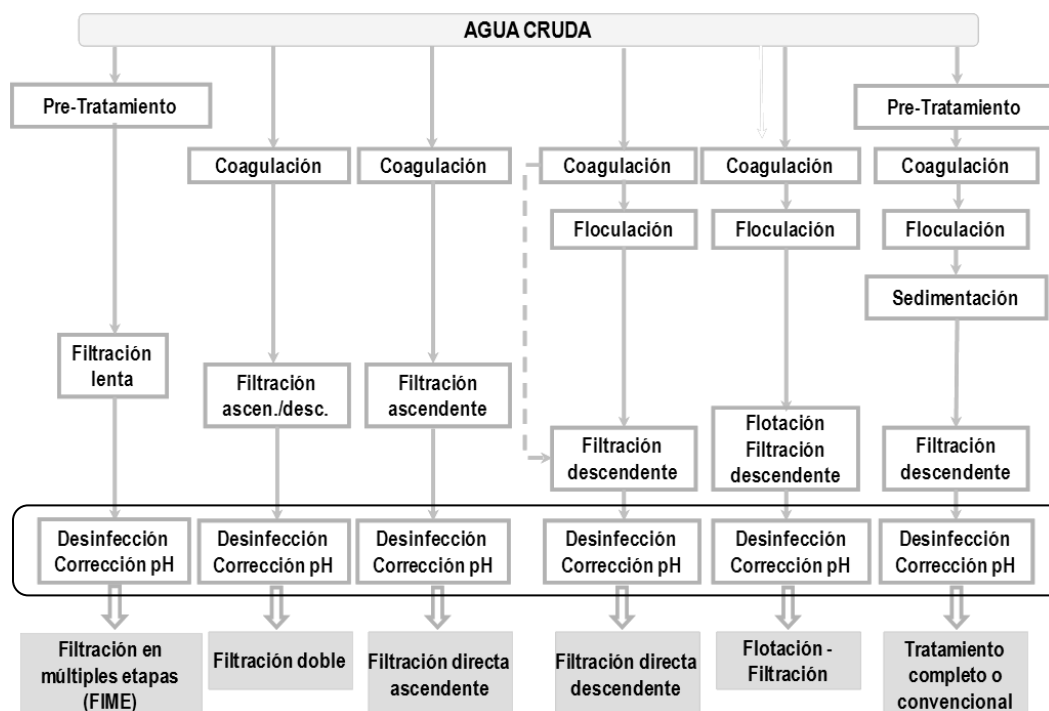


Figura 1. Principales tecnologías de tratamiento de agua para consumo humano

Fuente: Adaptado de Di Bernardo & Sabogal (2008)

En Colombia, el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2000) tiene en cuenta las características de la fuente de abastecimiento, clasificándolas como aceptable, regular, deficiente y muy deficiente y sugiere tratamientos convencionales que utilizan procesos que incluyen la adición de productos químicos como coagulantes y desinfectantes los cuales alteran el equilibrio del sistema carbonato en el agua, por lo que el balance químico debe ser reajustado durante y/o después del tratamiento, asegurando su estabilidad en la distribución del agua potable (Heller & De Pádua, 2006).

### 3.2 Estabilización de pH

El agua siempre se ioniza en pequeña proporción, produciendo tantos iones hidrógeno ( $H^+$ ) como iones hidroxilo ( $OH^-$ ) como se presenta en la Ecuación 1.



Consecuentemente, el agua puede considerarse desde el punto de vista de la ionización, a la vez como ácido y como base; también es considerada como neutra, debido a que la concentración de los iones hidrógeno e hidroxilo son iguales. El pH es una medida de la actividad de los iones  $H^+$  presentes en el agua y por lo tanto, una medida indirecta de los iones  $OH^-$  (Hilleboe, 2000). Debido a que los iones  $H^+$  son unas de las principales sustancias que aceptan los electrones cedidos por un metal cuando se corroe, el pH es un factor importante a tener en cuenta (Schock, 2002).

La estabilización o ajuste de pH es el término que se aplica al acondicionamiento químico del agua para reducir su capacidad corrosiva y asegurarse que no forme incrustaciones (Casey, 2009). Este método de solución es más común, de fácil aplicación y bajo costo comparado con los costos generados por la rehabilitación de las redes de distribución (De Sousa et al. 2010) y consiste en mantener una deposición controlada de la película de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) sobre la superficie de las tuberías (CNA, 1994).

Existen diversas formas para generar la película de carbonato de calcio como el equilibrio del sistema carbonato a partir del ajuste de pH (incrementando la alcalinidad y/o dureza), la concentración de dióxido de carbono libre ( $CO_2$ ) o la concentración de carbonatos ( $CO_3^{-2}$ ) del agua y al equilibrio de saturación de  $Ca(HCO_3)_2$  (Varó Galván et al. 2004; Casey, 2009). Un agua estabilizada no disuelve ni precipita  $CaCO_3$ , no remueve la película de  $CaCO_3$  que protege las tuberías contra la corrosión, ni precipita depósitos de  $CaCO_3$  que pueden obstruirlas (Trujillo et al. 2003).

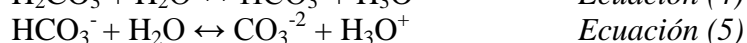
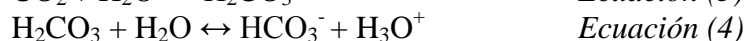
La alcalinidad es una medida de la capacidad de un agua para neutralizar ácidos (Schock, 2002). La alcalinidad total está descrita, principalmente por la Ecuación 2.

$$\text{Alcalinidad Total} = 2[CO_3^{-2}] + [HCO_3^-] + [OH^-] - [H^+] \quad \text{Ecuación (2)}$$

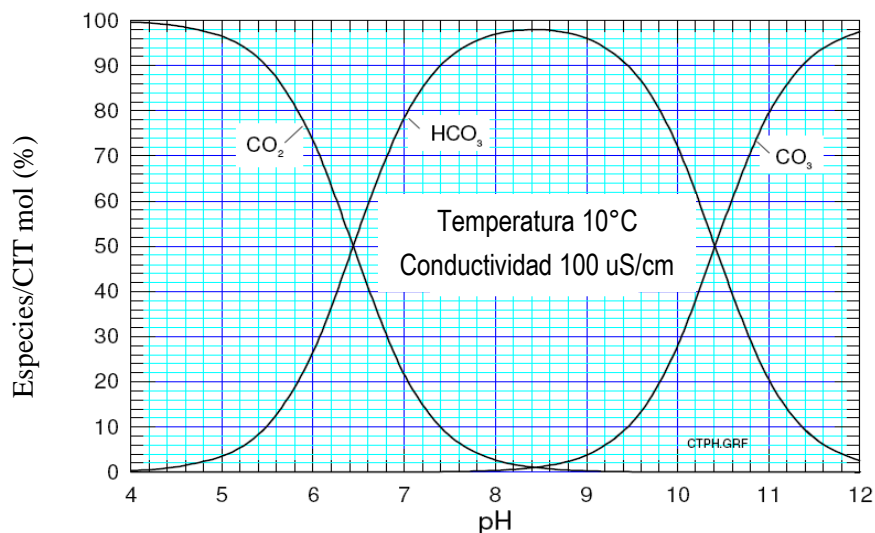
Donde [ ] indica la concentración en mol/L y la alcalinidad total en equivalentes/L. Operativamente, se define mediante la titulación alcalimétrica al punto de equivalencia del ácido carbónico. La concentración de iones bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) y carbonato ( $CO_3^{-2}$ ), está directamente relacionada con el pH del agua y la concentración del carbono inorgánico total (CIT) a través de la disociación del ácido carbónico (Schock, 2002; De Moel et al. 2013).

Las especies del CIT en el agua, comúnmente llamado el sistema carbonato, es representado por las especies de dióxido de carbono gaseoso libre ( $CO_2$ ), ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), iones bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) y los iones carbonato ( $CO_3^{-2}$ ) (Loewenthal et al. 2004; Kim et al. 2008), en donde la suma de las concentraciones de las especies de carbonato, expresado como concentración molar constituye el CIT. El comportamiento del sistema

carbonato es influenciado por la concentración de  $\text{CO}_2$  libre, la cual debe permanecer en equilibrio. Según González (1997) y Sallanko et al. (2013), el  $\text{CO}_2$  en equilibrio es la cantidad que debe estar presente en el agua para mantener en solución al bicarbonato; si existe  $\text{CO}_2$  en exceso, éste ataca al  $\text{CaCO}_3$  para aumentar la concentración del bicarbonato y mantener el equilibrio; por otro lado, si hay deficiencia de  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CaCO}_3$  se precipita para disminuir la concentración de bicarbonato, aumentando así el  $\text{CO}_2$  y restableciendo el equilibrio. Cuando el  $\text{CO}_2$  se disuelve en el agua, reacciona con ella para formar ácido carbónico, el cual se disocia en iones hidrógeno y el ión bicarbonato, seguido de la formación del ión carbonato, como se presenta en las Ecuaciones 3,4 y 5 (NALCO, 1988; De Moel et al. 2013):

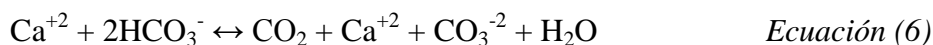


La distribución de la especie carbonato se presenta en la Figura 2, la cual muestra la existencia del balance entre el  $\text{CO}_2$  en exceso y los iones  $\text{HCO}_3^-$  en el rango de pH entre 4.4 y 8.4 y por encima de un pH de 8.5, el  $\text{CO}_2$  deja de existir en cantidades medibles y el ión  $\text{CO}_3^{2-}$  empieza a aparecer; por lo tanto, el  $\text{HCO}_3^-$  es la principal fuente de alcalinidad en aguas naturales (Branan, 2011).



**Figura 2.** Diagrama de distribución de las especies químicas del  $\text{CO}_2$  a  $10^\circ\text{C}$   
**Fuente:** Casey (2009)

Las especies del sistema carbonato afectan reacciones trascendentales en la química de la estabilización del pH, entre ellas la habilidad del agua para formar una película protectora de carbonato de calcio en el Sistema de Distribución de Agua (SDA) en conjunto con las concentraciones de los iones de calcio que provienen del agua, presentada en la Ecuación 6 (Schock, 2002; De Moel et al. 2013).





### 3.2.1 Importancia de la estabilización del pH

Realizar la estabilización del pH de manera inadecuada, trae como consecuencia posibles problemas de formación de biopelículas en los SDA, incrustación y corrosión. Reyes et al. (2008) evaluaron la relación de las biopelículas microbianas con los altos niveles de cobre medidos en el agua potable en 5 casas de Talca, una ciudad de aproximadamente 200.000 habitantes localizada a 256 km del sur de Santiago, Chile. Tres de las casas fueron rurales y dos urbanas. Los resultados mostraron que las casas rurales contenía más de 5 mg/L de cobre soluble en comparación con sólo 0,4 mg/L en las casas urbanas y la superficie interior de las tuberías de cobre en casas rurales mostró depósitos muy porosos y microorganismos en forma de bastón, identificando una cepa bacteriana llamada *Variovorax sp*; por el contrario, las tuberías de cobre de las casas urbanas no contenían biopelículas bacterianas. Esta experiencia concluye que la existencia de biopelículas bacterianas, junto con la calidad del agua agresiva podría contribuir al incremento de la concentración del cobre en el agua y la formación de picaduras o agujeros en la superficie de las tuberías de cobre.

Otra experiencia relacionada con la formación de biopelículas y los niveles de hierro en SDA la presentan Sun et al. (2014a), en donde muestran mediante un análisis estadístico que el consumo de alcalinidad total y la demanda química de oxígeno en el SDA se correlacionó con la abundancia de las *Proteobacterias* y *Firmicutes*, respectivamente; además de identificar que las bacterias que predominan en las biopelículas formadas en el SDA son principalmente *Bacillus* asociadas a la reducción del hierro y *Acidovorax* asociadas a bacterias oxidantes del mismo, las cuales podrían contribuir a la formación de mayores escalas de corrosión.

Las incrustaciones en los SDA presentan disminución en la capacidad del transporte del agua, aumentando los costos de bombeo (Volk et al. 2000) o incluso poder llegar a destruirlos por completo, debido a características como la alta dureza (150 a 300 mgCaCO<sub>3</sub>/L) (Spellman & Drinan, 2000). Houben (2003) indica que la incrustación en el norte de Alemania, consiste principalmente en óxidos de hierro, mostrando que a menudo se presenta una distribución no homogénea en los SDA; Houben & Weihe (2009), encontraron en un SDA en Alemania incrustaciones que disminuyeron significativamente el rendimiento del SDA, siendo necesario cambiar la red de tuberías.

La corrosión da lugar a altas concentraciones de metales en el agua, como el hierro que genera tinción, siendo una queja frecuente de los consumidores; el agua de “color” se forma cuando el hierro entra en el agua en forma de partículas férricas o como hierro ferroso (Shams, 2009; Sun et al. 2014b). Sarin et al. (2004) evaluaron la liberación del hierro, confirmando que proviene del material de la tubería oxidada principalmente en forma ferrosa. Al presentarse oxígeno disuelto en el agua, se observaron concentraciones más altas de hierro durante el represamiento en comparación con la continuidad del flujo; además, encontraron que el aumento de la concentración de oxígeno disuelto durante un represamiento del agua, reduce la concentración de hierro ferroso por medio de la oxidación y posterior precipitación.



La liberación de los metales debida a la corrosión también se ha estudiado en las zonas rurales del distrito de Charsadda, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistán. Khan et al. (2012) investigaron las concentraciones de diversos contaminantes en el agua potable, encontrando que se observaron concentraciones de Plomo, Cadmio, Níquel y Hierro que superaron los límites permisibles establecidos por las diferentes organizaciones en algunas localidades, además de contaminación bacteriana de coliformes, lo que se puede atribuir a varios factores como los usos de la fuente de abastecimiento, la cual presenta aplicación de agroquímicos (pesticidas y fertilizantes) e inadecuada disposición de aguas residuales y desechos sólidos, que se suman al estado de deterioro de las tuberías del SDA.

En Brescia – Italia, Sorlini et al. (2013) evaluaron la liberación de metales en siete edificios públicos durante dos periodos de monitoreo, mostrando que metales como plomo, níquel, zinc y hierro exceden la Directiva 98/83/CE; según González et al. (2013), las características de la calidad del agua podrían verse afectadas por las interacciones con los materiales de las tuberías generando la presencia de metales en el agua como el hierro, cobre, plomo, zinc, aluminio, cromo y cadmio.

La corrosión es la primera causa de deterioro estructural de los SDA con materiales metálicos, causando roturas y fugas, lo cual no solamente pone en peligro el funcionamiento del sistema de abastecimiento sino también al usuario final siendo una ruta fácil para que los contaminantes puedan ser introducidos dentro del agua de suministro (Jiang et al. 2012; Pérez-Vidal et al. 2012).

Sadiq et al. (2004) utilizaron un análisis probabilístico del riesgo de ocurrencia en la aplicación de las fallas en la red de hierro debida a la corrosión, ya que reduce la capacidad de la tubería para resistir los esfuerzos. Cuando las tensiones exceden la resistencia de la tubería, se presenta la rotura y se reduce la confiabilidad del SDA para el transporte del agua potable. En el análisis probabilístico utilizaron la simulación de Monte Carlo, revelando que la contribución de las variables de profundidad de las picaduras y el factor de inhibición de la tasa de corrosión, generaron la rotura de la tubería en el 1.7% de los casos, en los primeros 15 años de vida. Otras contribuciones importantes fueron la anchura de la zanja en la que la tubería se haya instalado, la resistencia a la fractura y los coeficientes de momento flexionante.

### **3.3 Métodos de monitoreo y medición para el control del proceso de la estabilización del pH**

Existen varios métodos de monitoreo y medición del proceso de la estabilización del pH basada en la deposición controlada de la película de carbonato de calcio; estos métodos pueden dar bases para ejercer un programa de control, clasificados en directos e indirectos (Schock, 2002; GQ, 2006).

#### **3.3.1 Métodos directos**

Dentro de esta categoría se incluyen: *i)* inspección física, observación macroscópica y microscópica en el interior de las tuberías, lo que proporciona un diagnóstico del grado de la corrosión o incrustación por no llevarse a cabo una buena estabilización del pH; *ii)*

análisis químico, presenta información sobre el tipo o causa de la corrosión o incrustación y *iii*) técnicas microscópicas, como los rayos X e infrarrojos (De Sousa et al. 2008). La Tabla 1 describe brevemente los métodos directos, su utilidad y sus limitaciones.

**Tabla 1.** Características de los métodos directos

MÉTODO	PRINCIPIOS	APLICACIONES	LIMITACIONES
Inspección física (Observación macroscópica y microscópica)	Se puede observar la medida acumulativa de la pérdida de metal de una superficie definida o la acumulación de depósitos en un período de exposición prolongada.	Este método proporciona una indicación visual de la morfología y escala o grado de la corrosión o incrustación.	Requiere continua inspección al menos de 90 días para determinar un buen intervalo de confianza estadístico.
		Esta técnica se utiliza a menudo como punto de referencia para otras medidas.	Son costosas ya que exige continua mano de obra y análisis de laboratorio.
Análisis químico	Puede hallarse valiosa información acerca de las posibles causas o mecanismos de inhibición por medio del análisis químico de los materiales subproductos de la corrosión o incrustación.	Otorgan una buena supervisión de la película de carbonato de calcio que ocurre en la instalación evaluada.	Los resultados numéricos no pueden ser relacionados cuantitativamente con la cantidad de corrosión o incrustación aparecida, ya que se está analizando solo una parte de la tubería.
		Los análisis deben realizarse con base al tipo de tubería.	
Técnicas microscópicas	Otorgan un análisis más detallado de la formación de la película de carbonato de calcio en las tuberías, presentando vistas muy amplificadas de la superficie de los materiales.	Es ampliamente utilizada para la evaluación de la corrosión de tuberías A-C (Asbesto-Cemento).	Incremento en los costos por ser análisis específicos
		Se han utilizado para examinar las partículas del agua potable.	

Adaptado de Schock (2002); Mora & Cedeño (2006); De Sousa et al. (2008).

### 3.3.2 Métodos indirectos

Los métodos indirectos incluyen: *i*) pruebas hidráulicas, como la determinación del coeficiente de Hazen-Williams; *ii*) Registro e informe de quejas por parte de los consumidores, siendo la primera evidencia de los problemas en los SDA y parte de un programa de control e *iii*) índices, que predicen el comportamiento del agua en los SDA. La Tabla 2 describe brevemente los métodos indirectos, su utilidad y sus limitaciones.

Los métodos directos presentan como principal característica los costos elevados que se requieren para su evaluación, mientras que los métodos indirectos ofrecen alternativas más económicas (Schock, 2002). Dentro de los métodos indirectos, las pruebas hidráulicas presentan una desventaja, ya que su aplicación determinaría una posible eliminación o acumulación de los depósitos en las tuberías teniendo en cuenta el tipo de material empleado; esta técnica se aplicaría a cada tramo del SDA (Letterman, 2001). Al observar las características de los demás métodos indirectos, tales como los registros e informe de quejas de los usuarios y la aplicación de los índices, en su conjunto pueden presentar un análisis preventivo de la estabilización del pH, ya que se tendría evidencia por los usuarios y un control sobre el último proceso en la planta de potabilización.

**Tabla 2.** Características de los métodos indirectos

MÉTODO	PRINCIPIOS	APLICACIONES	LIMITACIONES
Pruebas hidráulicas	Determinación del coeficiente de Hazen-Williams (C)	Por ser una propiedad intrínseca directamente relacionada con la rugosidad de la superficie interior de la tubería, en donde una modificación de la rugosidad de la superficie interior provoca una variación del coeficiente de fricción, el cálculo de éste presentaría la posible eliminación o acumulación de depósitos en la tubería.	La ecuación es de carácter empírico, resultante de ensayos y pruebas realizadas en 1930; además, su aplicación depende de las características de la tubería del SDA.
Registro e informe de quejas por parte de los consumidores	Son la primera evidencia de los problemas que se presentan en un SDA o en la planta de tratamiento.	Este método junto con la información de los materiales en servicio y encuestas, son herramientas útiles de monitoreo que pueden utilizarse como parte de un programa de control.  La información resultante indicaría el efecto real de la calidad del agua potable y presentaría el efecto de cualquier cambio en el proceso de estabilización ya que lo usuarios son los primeros en evidenciar los problemas de corrosión o incrustación	Se requiere de una base de datos acumulada en un periodo de tiempo largo
Índices	Evalúan la estabilización del pH como indicador para predecir las características del agua	Son de tipo cualitativo o cuantitativo y se fundamentan en la existencia de una fina capa de $\text{CaCO}_3$ en la superficie de las tuberías para evaluar el equilibrio del $\text{CaCO}_3$ en el agua, indicando su carácter agresivo, corrosivo o incrustante.	Muchos de los índices son más útiles "después del hecho", para ayudar a comprender las posibles causas del problema, en lugar de ser útil en un sentido predictivo.  Han sido mal aplicados cuando no se conocen sus limitaciones

**Fuente:** Rompré, A., (1996); Letterman, (2001); Schock (2002); Trujillo et al. (2008).

Los índices son una técnica económica y sencilla de realizar, ya que evalúan las características a la salida de la planta de tratamiento, en donde las variables para su cálculo no implican mayores costos a comparación de los efectos adversos que se presentarían en el SDA como por ejemplo, la reparación de las tuberías, efectuando así un control rápido y fácil en el proceso de estabilización del pH (Trujillo et al. 2008; Health Canada, 2009; Furtado et al. 2011).

### 3.4 Índices

Los índices son una herramienta que predice el comportamiento de las características del agua al final de la potabilización ya que utiliza variables que influyen en el proceso de estabilización, por lo cual son métodos indirectos (Droste, 1997; Shams, 2009; Delion et al. 2004). Se han propuesto una serie de índices para evaluar indirectamente la estabilización del pH, intentando predecir si un determinado tipo de agua es agresiva, corrosiva o

incrustante (Imran et al. 2005; De Sousa et al. 2010; De Moel et al. 2013). La agresividad corresponde al efecto del agua sobre la disolución del material de la tubería, causando la destrucción de la integridad del material; la corrosividad son las reacciones electroquímicas que se presentan entre el agua y la tubería del sistema, lo que puede dar lugar a la disolución del metal y la precipitación de sales metálicas dando como resultado picaduras, color al agua, entre otros que finalmente conllevan a la destrucción del conducto. La incrustación es debida a la precipitación excesiva de minerales como el calcio y el hierro en las paredes de los conductos, siendo tan extensa que reduce severamente la capacidad de transporte del agua llegando en algunas ocasiones a ser cero (Loewenthal et al. 2004).

Los índices pueden ser de tipo cualitativo o cuantitativo, algunos se fundamentan en la existencia de una fina capa de  $\text{CaCO}_3$  en la superficie del sistema de distribución, evaluando el equilibrio del  $\text{CaCO}_3$  en el agua e indicando su posible tendencia o característica en el SDA y otros evalúan el comportamiento del agua dependiendo del tipo de tubería (Trujillo et al. 2008; Health Canada, 2009).

### **3.4.1 Experiencias en la aplicación de índices**

Los índices se han aplicado como técnica de control para predecir las características químicas del agua y evitar los problemas en el SDA. Cabe destacar que Mora y Cedeño (2006) realizaron un estudio sobre calidad y corrosión en aguas de las plantas de tratamiento Angostura y Guri del estado Bolívar-Venezuela, donde evidenciaron que las aguas provenientes de los ríos Orinoco y Caroní son corrosivas, lo cual fue comprobado de acuerdo a los valores de los Índices de Saturación de Langelier (ISL) y el índice de Estabilidad de Ryznar (IER) para el agua tratada en ambas plantas. Conforme a este estudio, se puede inferir que valores bajos de pH y de carbonato en el agua impiden la formación de incrustaciones protectoras presentándose una tendencia corrosiva en los materiales metálicos. Los valores de las tasas de corrosión para las aguas de la red de ambas plantas pueden relacionarse con los cambios fisicoquímicos y bacteriológicos en los tanques elevados de almacenamiento y redistribución con escaso mantenimiento, la selección del material inadecuado para tuberías y/o la combinación errónea de materiales, produciendo corrosión en la red.

Al observar los diversos problemas que se presentaban en el agua potable de Tahtali-Turquía, tales como la presencia de metales tóxicos, deterioro y daños en las tuberías internas del hogar y problemas estéticos de color, sabor amargo y manchas de color marrón rojizo, Küçükgül y Özdağlar (2004) determinaron la aplicación de índices por un período de un año dentro de los cuales están el índice de Saturación de Langelier ISL, índice de Fuerza de conducción de Mc Cauley (IFC), índice de agresividad (IA), índice de Estabilidad de Ryznar (IER) e índice de corrosión de Riddick (ICR). De acuerdo con los resultados, el agua se considera corrosiva, evitando la precipitación de carbonato de calcio en el interior del SDA. Los problemas de la calidad del agua se encontraron principalmente por el material ferroso que contiene una alta concentración iónica y dióxido de carbono disuelto, lo cual aumenta la conductividad del agua y por ende la corrosión.

En Dhekelia – Chipre, la planta de potabilización que abastece a los distritos de Famagusta, Larnaca y Nicosia, se observó un cambio en el color del agua entre 20-30 km de la planta,

en donde el material principal del SDA consistía en tuberías de hierro, por lo que Marangou y Savvides (2001), evaluaron el ISL presentando resultados negativos (agua subsaturada). Con el fin de resolver el problema, analizaron las características del agua y se decidió cambiar el rango de pH 7,0 a 8,0 a 6,5-9,5. Con relación a este pH, utilizaron los diagramas de Caldwell-Lawrence reajustando la dosis de cal y de dióxido de carbono, aunque generó el incremento de la turbidez (3-4NTU). Con el aumento de pH a valores de más de 8.5, el índice de Langelier aumentó a 0.0-0.5 y disminuyó el contenido de hierro.

Como resultado de la evaluación del proceso de estabilización en la red de distribución de Toluca-México, Trujillo et al. (2008) implementaron el modelo de Mojmir-Mach y la aplicación de los ISL y IER en el principal tanque debido a las manifestaciones corrosivas detectadas en la infraestructura hidráulica. La aplicación del índice IER indicó que existe una tendencia agresiva, lo que se confirmó por el método de Mojmir Mach e ISL, siendo los pH de saturación (pHs) de los métodos cualitativos y cuantitativos similares y confirmando que el uso de métodos cuantitativos es de mejor aplicación. En este estudio se utilizó como ayuda el programa AgrInc\_Agua 2.0, el cual indica de forma gráfica y numérica el tipo de agua y determina el punto necesario para mantenerla en equilibrio químico, los resultados indicaron que existe un cambio en el sistema carbonato en el primer y sexto mes de aplicación en el que el incremento de la concentración del ión calcio favorece la formación del carbonato de calcio a partir de valores de pH de 7.7, debajo del pH equilibrio que es de 8.6, por lo que se deben buscar alternativas distintas al carbonato de calcio e hidróxido de calcio, para ajustar el equilibrio químico del agua.

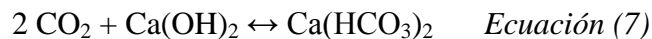
### 3.5 Alcalinizantes

Existen varios productos químicos utilizados en el proceso de estabilización del pH para el tratamiento del agua potable que incrementan la alcalinidad, alterando el pH del agua y la distribución de las especies de carbonato, los cuales incluyen la neutralización con una base (cal hidratada y soda cáustica) y la neutralización con un carbonato alcalino ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$ ) (GQ, 2006; De Sousa et al. 2008; Gray, 2008; Kim et al. 2008).

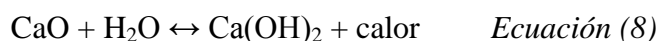
#### 3.5.1 Neutralización con una base

##### \* *Cal hidratada – $\text{Ca}(\text{OH})_2$*

La cal hidratada es una base fuerte, considerada uno de los alcalinizantes más económicos, de fácil adquisición (Lozano, 2006; Torres et al. 2008) y más utilizado para neutralizar el  $\text{CO}_2$  libre, elevando la alcalinidad para ajustar el pH de agua adecuado como lo muestra la Ecuación 7.



La cal hidratada puede conseguirse directamente en el mercado como cal apagada; sin embargo, contiene muchas impurezas que incrementan la turbiedad en el agua tratada (Di Bernardo & Sabogal, 2008). Otra forma de obtener cal hidratada es mediante el proceso de apagado de la cal viva ( $\text{CaO}$ ), el cual consiste en adicionar agua al  $\text{CaO}$  para producir  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mediante el fenómeno físico (movimiento browniano) y químico (reacción exotérmica – Ecuación 8) (Lozano, 2006).



Se debe resaltar que la cal hidratada es un producto con baja solubilidad y requiere de grandes cantidades para obtener un resultado razonable (Kim et al. 2008).

#### \* *Soda cáustica – NaOH*

La soda cáustica (NaOH) es una base fuerte por lo que se requiere mayor cuidado durante su manipulación, no forma sales insolubles y una sobredosificación del producto ocasionaría un incremento súbito del pH (Torres et al. 2008). Según Casey (2009), el uso de NaOH al igual que para el  $\text{Ca(OH)}_2$  es apropiado para aguas con baja alcalinidad, utilizando generalmente  $\text{CO}_2$  libre para formar carbonato de sodio soluble o bicarbonato. La Ecuación 9 muestra la reacción de formación.



### 3.5.2 Neutralización con un carbonato alcalino

En aguas con baja alcalinidad, el ión carbonato debe agregarse para formar carbonatos insolubles. Para tales aguas, los carbonatos alcalinos son generalmente los químicos preferidos y usados para ajustar el pH, debido a que aportan directamente iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) o bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), los cuales generan capacidad buffer al sistema y permiten resistir cambios de pH en el SDA (Lahav et al. 2009; Birnack et al. 2011). El número de iones carbonato disponible es una función compleja del pH, temperatura y otras variables de la calidad del agua (Letterman, 2001; De Sousa et al. 2010).

#### \* *Bicarbonato de sodio – NaHCO<sub>3</sub>*

El  $\text{NaHCO}_3$  es una sal formada por una base fuerte (NaOH) y un ácido débil ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), siendo fácil de manipular y bastante soluble (Torres et al. 2008). La adición  $\text{NaHCO}_3$  es útil para aumentar la alcalinidad del agua y/o para elevar el pH (especialmente para optimizar el pH en el proceso de coagulación/floculación) (GQ, 2006). Es posible que se deba usar en combinación con pequeñas cantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$  o NaOH (Casey, 2009). El  $\text{NaHCO}_3$  se disocia en el agua de acuerdo a la Ecuación 10 (Kim et al. 2008).

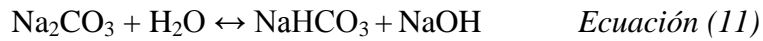


Presenta como ventajas su fácil manipulación pero no reacciona con el  $\text{CO}_2$  (Torres et al. 2008). GQ (2006) recomienda su uso para pequeñas instalaciones o cuando la dosificación de la cal está generando problemas.

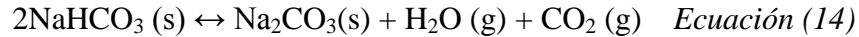
#### \* *Carbonato de sodio – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>*

El carbonato de sodio o comúnmente llamado “soda ash”, aumenta la alcalinidad total mediante la introducción de los iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) de acuerdo con las ecuaciones 11, 12 y 13; al mismo tiempo el pH se incrementa por la reacción del ion  $\text{OH}^-$  presentada en la Ecuación 13 (Di Bernardo & Sabogal, 2008).





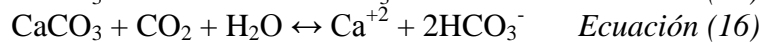
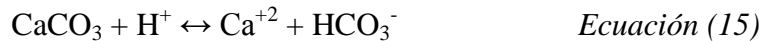
El carbonato de sodio también es utilizado como alcalinizante y puede ser adquirido en forma anhidro ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) o hidratado ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$ ) (Di Bernardo & Sabogal, 2008). También se puede obtener a partir del bicarbonato de sodio por calentamiento como se presenta en la Ecuación 14 (Ebbing & Gammon, 2010).



El carbonato de sodio es una sal y su uso es muy sencillo (GQ, 2006); sin embargo, en Colombia se requiere de permisos especiales para su uso al ser una sustancia controlada.

#### \* *Carbonato de calcio – $\text{CaCO}_3$*

El  $\text{CaCO}_3$  es uno de los minerales de ocurrencia natural más abundantes en la tierra (Lozano, 2006); es un producto poco soluble, que se disuelve muy lentamente en el agua consumiendo iones hidrógeno y reaccionando con el  $\text{CO}_2$ , como se observa en las ecuaciones 15 y 16 (Stumm & Morgan, 1996).



A diferencia de productos como el  $\text{NaOH}$ , el  $\text{CaCO}_3$  al ser usado en el proceso de estabilización, además de incrementar el pH también incrementa la dureza del agua; aunque al ser un material con una solubilidad muy baja ( $0.0014\text{g}/100\text{g H}_2\text{O}-20^\circ\text{C}$ ) se requiere acidificar el agua en un reactor de disolución con ácido sulfúrico o  $\text{CO}_2$  (Cotoruelo & Marqués, 1999; Lehmann et al. 2013).

### 3.5.3 Experiencias con los diferentes alcalinizantes

Los diversos tipos de alcalinizantes se han evaluado como estrategia de control para el ajuste del pH y la alcalinidad, lo que conlleva a generar la película de carbonato de calcio en el SDA. Furtado et al. (2011) compararon las principales características de la cal hidratada, carbonato de sodio y bicarbonato de sodio para la calidad del agua, encontrando que el hidróxido de calcio y el bicarbonato de sodio son compuestos eficaces para aumentar la alcalinidad, mientras que el carbonato de sodio no era tan eficaz para tal fin; sin embargo, aumenta el pH.

Rendón et al. (2013) evaluaron el ajuste de la alcalinidad y el pH utilizando cal hidratada, hidróxido de sodio y carbonato de sodio, con la finalidad de elegir el alcalinizante a utilizar y las concentraciones requeridas. Se realizaron ensayos de jarras midiendo variables como pH, alcalinidad, turbiedad y color. Los resultados permitieron escoger la cal hidratada como alcalinizante a utilizar teniendo en cuenta que la turbiedad y el color residual aumentaban directamente con las dosis; sin embargo, este producto presentó un excelente rendimiento y

presenta un costo razonable para la planta de tratamiento. También se encontró que el rango óptimo para la concentración de aplicación debía estar entre 1% y 3%, ya que valores por debajo de este rango no aportaban el contenido necesario de componente activo para el ajuste de pH mientras que concentraciones mayores excedían la solubilidad del producto.

Lozano (2006) evaluó a escala laboratorio el efecto del ajuste de pH por medio de cal hidratada en forma de suspensión y solución saturada sobre la turbiedad para el agua tratada del río Cauca. El pH se justó a valores de 7.0, 7.5, 8.0 y 9.0 unidades, aplicando distintas dosis. Los resultados mostraron que el aumento de turbiedad para el agua alcalinizada con solución saturada de cal no fue significativo, mientras que si lo fue para el agua ajustada químicamente con suspensión de cal, sobre todo para los pHs entre 7.4 a 9 unidades.

Debido a que la cal hidratada presenta baja solubilidad, requiere mayores cantidades en la dosificación para obtener resultados favorables en la estabilización del pH y la alcalinidad y tiende a incrementar la turbiedad, Kim et al. (2008) evaluaron el carbonato de sodio, validando un algoritmo de control de la corrosión con el Potencial de Precipitación del Carbonato de Calcio (PPCC) mediante la variación del pH y la alcalinidad. El efecto de control de la corrosión fue demostrado por la reducción de las concentraciones de hierro y zinc en la red, lo que indica que el carbonato de sodio forma la película protectora de  $\text{CaCO}_3$  que impide la lixiviación de estos metales.

En Honduras, Colindres (2010) realizó una evaluación del proceso de estabilización de pH en la Escuela Agrícola Panamericana, mediante pruebas de dosificación para el carbonato de sodio y el carbonato de calcio. Los resultados permitieron definir que los resultados son similares en cuanto a dosis requeridas para ambos productos, siendo 30 mg/L para el carbonato de sodio y 33 mg/L para el carbonato de calcio. Posteriormente, se realizó una comparación económica definiendo el carbonato de sodio como la opción más favorable. En el mismo lugar, Enríquez (2012) llevó a cabo la evaluación de la eficiencia de la estabilización de pH con carbonato de sodio y el control de los metales en el sistema. Los resultados presentaron un requerimiento de dosificación de 43.9mg/L y poco efecto en las concentraciones de Hierro y Aluminio en el sistema.

Como alternativas de alcalinizantes, Maddison et al. (2001) evaluaron a escala piloto y real, la adición de cal, polifosfato y el ajuste del pH con NaOH en la calidad del agua en el SDA regional de Halifax (Reino Unido); para la escala piloto se utilizaron cuatro secciones de tubería de hierro fundido de 1.5 m y de 100 años de edad, en donde se varió el flujo tanto continuo como batch (agua en reposo durante 1, 3, 6 y 12h), representando las condiciones donde se pueden presentar zonas muertas en el SDA y a escala real se utilizaron ocho puntos de muestreo en el SDA. Los resultados indicaron que tanto la cal y los polifosfatos, proporcionan un rendimiento similar a escala piloto para flujo continuo y batch; sin embargo, el incremento de la adición de cal aumentó significativamente los niveles de turbiedad, lo que resultó en la deposición excesiva de material insoluble durante los períodos de batch. En la escala real, los polifosfatos proporcionaron una mejor protección a la corrosión que el ajuste del pH con NaOH, lo que indica que sería la mejor estrategia de control seguida por la adición de NaOH.



Otra de las consecuencias que se presentan en los SDA con corrosión es la liberación del plomo que afecta la salud humana. Tang et al. (2006) evaluaron el ajuste del pH y la alcalinidad (parámetros que afectan la corrosión) con bicarbonato de sodio, encontrando que la precipitación del bicarbonato puede reducir la liberación de plomo mediante la formación o mejora de la película en la superficie de las tuberías; este efecto se observó cuando se incrementó el  $\text{pH} > 7.9$  y la alcalinidad. Teniendo en cuenta que el bicarbonato aporta alcalinidad y mantiene un pH cercano a la neutralidad (Furtado et al. 2011), siendo un producto inofensivo para los humanos incluso cuando están presentes en niveles elevados (Takasaki & Yamada, 2007), el bicarbonato ha demostrado que disminuye la corrosividad del agua tratada, evidenciado en los índices ISL y Larson-Skold, los cuales consideran al bicarbonato para inhibir la corrosión del hierro en los SDA (Rokicki y Boyer, 2011).

Al observar que la formación de la película de carbonato de calcio, puede ser inducida para minimizar los problemas de incrustación y corrosión en el SDA desde la planta de tratamiento en el último proceso de potabilización (estabilización del pH), este trabajo de grado evaluó dicho proceso para el agua tratada del río Cauca mediante la aplicación de los índices más importantes a la salida de una planta de potabilización que permitan una mejora integrada de la calidad del agua en los SDA, teniendo en cuenta las variables que se requieren para su cálculo, aplicación y análisis de resultados. Además de evaluar diferentes opciones de alcalinizantes que permitan garantizar un adecuado control de este importante proceso en la potabilización del agua y en protección de los SDA.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

Evaluar el proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca orientado a la identificación de medidas de control para su optimización.

### **4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Identificar los índices de mayor aplicabilidad para el control del proceso de estabilización del pH.
- ✓ Determinar los índices potencialmente aplicables para el control del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca.
- ✓ Evaluar a escala laboratorio la estabilización del pH del agua tratada del río Cauca con diferentes alcalinizantes.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

El SDA de Santiago de Cali abastece a aproximadamente 2.5 millones de habitantes mediante cuatro fuentes superficiales: ríos Cauca, Cali, Meléndez y Pance. El estudio se realizó en la planta de tratamiento de Puerto Mallarino, concentrándose en el río Cauca por ser la principal fuente de abastecimiento de la ciudad (80%) (Pérez-Vidal et al. 2012).

El estudio se desarrolló en tres etapas principales:

- Identificación de los índices de mayor aplicabilidad para el control del proceso de estabilización del pH.
- Determinación de los índices potencialmente aplicables para el control del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca.
- Evaluación a escala laboratorio de la estabilización del pH del agua tratada del río cauca con diferentes alcalinizantes.

### 5.1 Identificación de los índices de mayor aplicabilidad para el control del proceso de estabilización del pH

Se realizó una amplia revisión de literatura consultando fuentes secundarias como libros, tesis, reportes nacionales e internacionales relacionadas con el proceso. Inicialmente se hizo una revisión conceptual de cada uno de los índices y métodos de mayor aplicación reportados en la literatura, clasificándose en 2 tipos (cualitativos y cuantitativos). Los cualitativos se agruparon como se observa en la Figura 3 y los modelos cuantitativos se observan en la Figura 4.

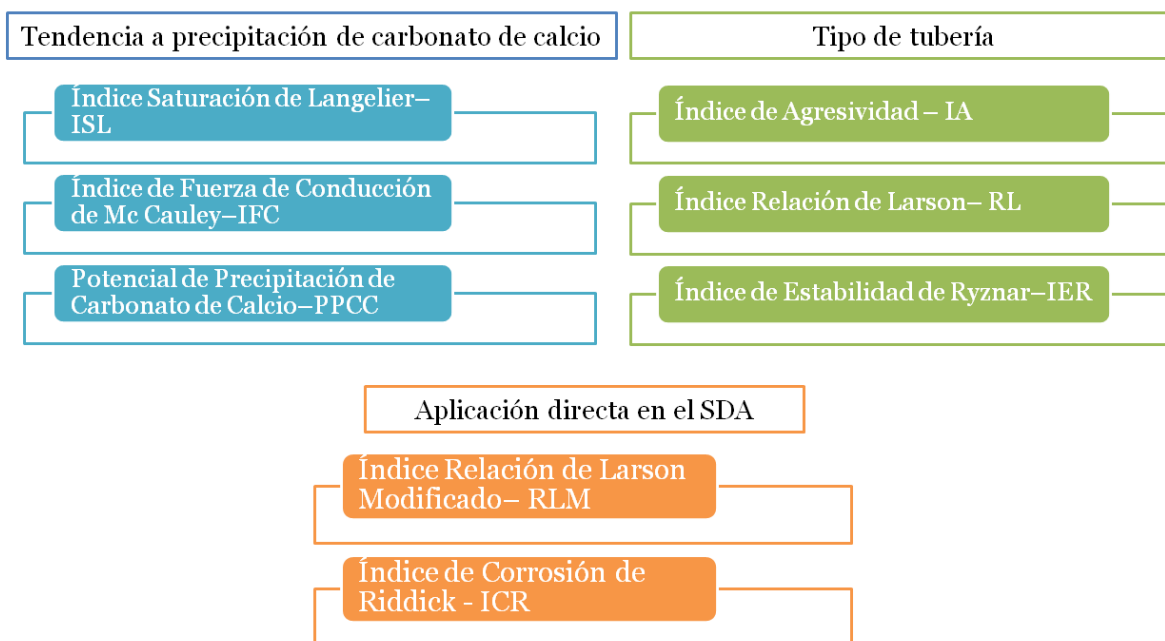
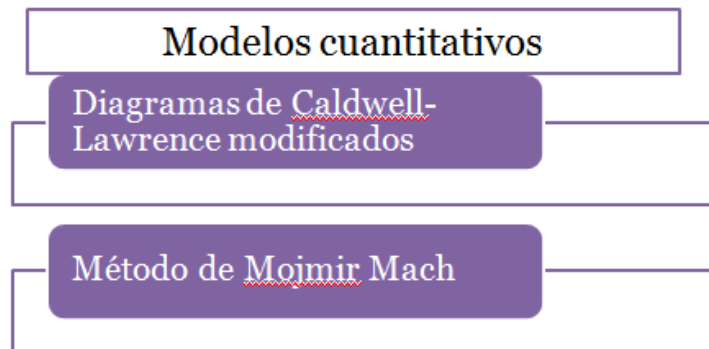


Figura 3. Índices cualitativos



**Figura 4.** Índices cuantitativos

Posteriormente se realizó un análisis comparativo con base en aspectos como variables requeridas para el cálculo, ecuaciones necesarias para determinar las variables no calculadas de manera rutinaria en la operación de las plantas, interpretación de los resultados de cada índice, utilidad, limitaciones, además de otras características como simplicidad, tiempo de respuesta e influencia del material.

Este análisis permitió identificar los índices de mayor aplicabilidad para el seguimiento del proceso de estabilización en los SDA y definir los índices a evaluar con la información histórica y de muestreos, para lo cual se tuvieron en cuenta criterios de exclusión como el requerimiento de: medición de variables específicas que no son comúnmente monitoreados en las plantas de tratamiento (silicatos y saturación de OD necesarias para calcular el índice ICR), la aplicación directa en el SDA y software especializado (necesarios para calcular el índice RLM y los modelos de Diagramas de Caldwell-Lawrence modificados y Método de Mojmir Mach). De acuerdo con esto, se seleccionaron los índices cualitativos que evalúan la tendencia a precipitación de carbonato de calcio (ISL, IFC, PPCC) y los aplicados al tipo de tubería (IA, RL, IER).

## **5.2 Determinación de los índices potencialmente aplicables para el control del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca**

Esta etapa constó de las siguientes actividades:

### **5.2.1 Identificación del efecto de la adición de los químicos (coagulante, polímero, adsorbente, desinfectante y estabilizador de pH) usados en los procesos de tratamiento para potabilización**

Se recopiló y procesó la información histórica horaria de la calidad del agua cruda, clarificada, filtrada y tratada del río Cauca durante el año 2012 disponible en EMCALI ESP EICE, relacionada con las variables turbiedad, alcalinidad total y pH recomendadas por Schock (2002), Montoya et al. (2011) y WHO (2011); además del tipo y dosis de productos químicos usados (coagulante, polímero, adsorbente, desinfectante y estabilizador de pH).

La información se sistematizó y analizó mediante un análisis estadístico descriptivo, calculando indicadores de tendencia central (media y mediana), con el fin de observar el efecto de la adición de químicos durante los procesos de potabilización.

### **5.2.2 Determinación de los índices de mayor aplicabilidad**

Se recopilaron y procesaron los datos diarios de la calidad del agua tratada del río Cauca del periodo 2010 – 2012 disponible en EMCALI EICE ESP, relacionada con las variables fisicoquímicas que influyen en el proceso de estabilización del pH y la determinación de los índices seleccionados en la etapa 5.1 (ISL, IFC, PPCC, IA, RL y IER); con el fin de observar el comportamiento actual del proceso, se realizaron seis jornadas de muestreo de cinco horas en muestras puntuales del agua tratada midiendo las mismas variables (pH, alcalinidad total, dureza total y cálcica, iones de calcio y magnesio, temperatura, cloruros, sulfatos y conductividad) mediante la metodología del APHA et al. (2005). Para el manejo de los datos, se aplicó un análisis estadístico descriptivo de indicadores de tendencia central como la media, mediana, mínimos, máximos y cuartiles, comparando los resultados de las variables y los índices calculados, con las recomendaciones de la literatura y sugerencias para la evaluación del proceso.

### **5.2.3 Identificación de opciones para controlar y evaluar el proceso de estabilización del pH**

Con base en el desarrollo y análisis de los resultados obtenidos, se plantearon recomendaciones para mejorar el control del proceso de estabilización de pH.

## **5.3 Evaluación a escala laboratorio de la estabilización del pH del agua tratada del río Cauca con diferentes alcalinizantes.**

Esta etapa constó de las siguientes actividades:

### **5.3.1 Análisis comparativo de la aplicación de los diversos alcalinizantes de pH**

Se consultó diversa bibliografía como libros, trabajos de grado, tesis doctorales, reportes, publicaciones, experiencias documentadas tanto nacionales como internacionales, lo cual permitió construir el estado del arte orientado a la búsqueda de las diversas opciones de alcalinizantes de pH. Los alcalinizantes identificados como los de mayor aplicación fueron cal hidratada, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio, carbonato de sodio y carbonato de calcio.

Las principales características de cada alcalinizante se agruparon en tres categorías: *i)* Aspectos técnicos, que incluyen la química, aniones que aportan alcalinidad total, capacidad buffer, dureza, cationes, detalles en almacenamiento y dosificación; *ii)* Aspectos de salud ocupacional valorados por la NFPA 704 (National Fire Protection Association) la cual clasifica cada alcalinizante como operación, inflamabilidad y reactividad; y *iii)* Aspectos económicos como facilidad de adquisición en Colombia, solubilidad en agua, porcentaje de contenido activo disponible y costos de materia prima.

Con base en las características encontradas de cada alcalinizante, se seleccionaron los alcalinizantes a evaluar en escala de laboratorio con el agua del río Cauca posterior a los tratamientos de adsorción, precloración, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y poscloración los cuales fueron cal hidratada, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y

carbonato de sodio, excluyendo el carbonato de calcio principalmente por limitaciones técnicas como dosificación y económicas como la adquisición en Colombia.

### **5.3.2 Evaluación de diferentes alcalinizantes**

Los alcalinizantes seleccionados fueron cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) y carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), éste último se formó al calentar preliminarmente la solución del bicarbonato de sodio, en donde esta etapa constó de las siguientes actividades:

#### ***Definición de la concentración de solución de alcalinizante***

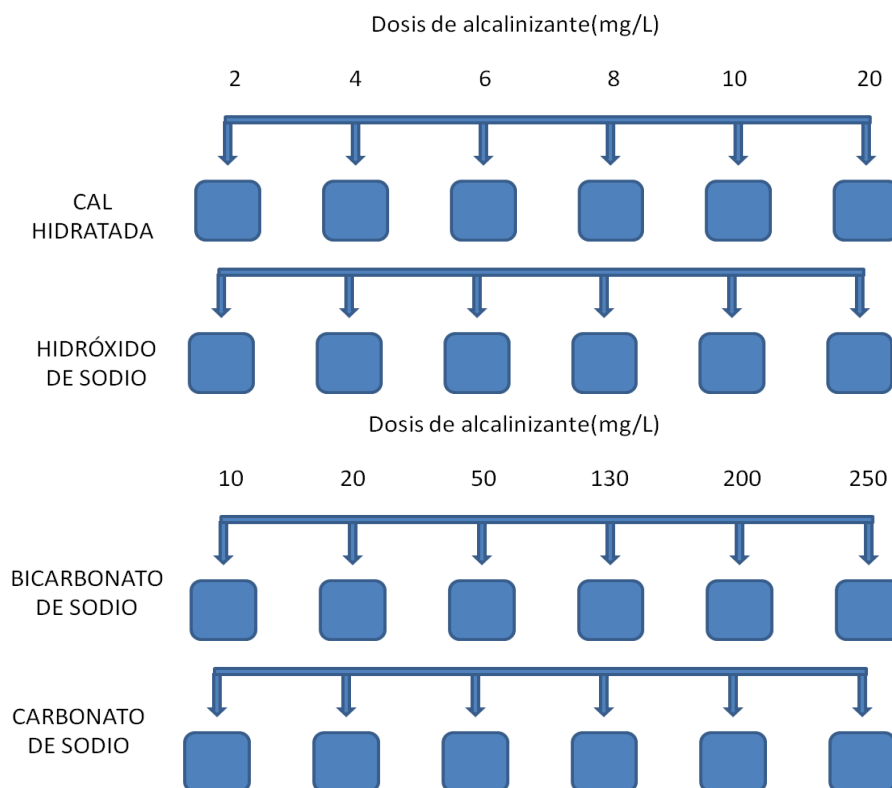
Autores como OPS/CEPIS (2002), Minambiente (2003), Withers (2005), Santore Zwitter (2009), Sánchez et al. (2010) y Rendón et al. (2013), recomiendan que las concentraciones de solución de los alcalinizantes varíen entre 1 – 5% evitando problemas en la preparación de las soluciones. Teniendo en cuenta que la Planta de Puerto Mallarino prepara cal hidratada con una concentración alrededor del 4%, se evaluó la concentración mínima sugerida en la literatura de 1% y la de 4%. Se preparó una solución madre con agua tratada. Para la cal hidratada, la solución madre fue del 4% siguiendo el procedimiento de la planta de Puerto Mallarino, mientras que para los demás alcalinizantes la solución madre fue de 20%.

Los ensayos de laboratorio para la preparación de las soluciones se realizaron a través de un equipo de pruebas de jarras, con volumen de 1L y condiciones de mezcla de un minuto a 300 RPM (Rendón et al. 2013). Para cada ensayo se caracterizaron las variables temperatura, pH y alcalinidad total de acuerdo con la metodología del APHA et al. (2005). Se elaboraron dos curvas de Alcalinidad y pH vs. Concentración de cada alcalinizante, lo que permitió observar el aporte de alcalinidad y el comportamiento del pH para las concentraciones de 1% y 4% de cada alcalinizante.

#### ***Dosis de alcalinizantes y aplicación de índices***

Una vez definidas las concentraciones de solución de los alcalinizantes, se realizaron ensayos preliminares con el fin de obtener las dosis que permitieran generar resultados satisfactorios para los índices de estabilización del pH, obtenidas cuando el pH final superó el pH de saturación (pHs) el cual se encuentra entre 8.7 – 9.0 unidades. Para el caso de la cal hidratada y el hidróxido de sodio, se definieron dosis de 2 a 20 mg/L y para el bicarbonato y carbonato de sodio, las dosis evaluadas variaron entre 10 a 250 mg/L.

Los ensayos por duplicado también se realizaron en un equipo de jarras, con un volumen de 2L necesarios para la medición de las variables. Con el fin de evitar la transferencia de  $\text{CO}_2$  atmosférico hacia el agua por agitación rápida, la cual puede afectar los resultados de pH y alcalinidad total mediante la reacción del  $\text{CO}_2$  con el agua que promueve la formación de las especies del sistema carbonato, se utilizaron condiciones de mezcla de 60 RPM con un minuto (Casey, 2009; Vargas et al. 2009; Colindres, 2010; Bordoloi et al. 2013). La Figura 5 muestra un esquema de los ensayos realizados.



**Figura 5.** Ensayo de dosis para diferentes alcalinizantes

Las variables que se monitorearon durante los ensayos se presentan en la Tabla 3, las cuales son necesarias para calcular los índices de mayor potencial de aplicación recomendados en el objetivo dos, los cuales permiten escoger un rango de dosis que proporcione la formación de la película de carbonato de calcio en el SDA; además de la medición de sodio (Na+) con relación al uso de productos que lo contienen, siendo recomendable controlar su concentración en el agua ya que puede generar rechazo por parte de los usuarios al presentar problemas de sabor en el agua (WHO, 2011).

**Tabla 3.** Variables de ensayo

VARIABLE	UNIDADES	TÉCNICA DE REFERENCIA*
pH	Unidades	4500-H <sup>+</sup> B
Alcalinidad Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	2320-B
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	2340 C
Dureza cálcica	mg CaCO <sub>3</sub> /L	
Calcio	mg Ca <sup>+2</sup> /L	3500-Ca D
Sodio	mg Na <sup>+1</sup> /L	3500-Na B
Temperatura	°C	2550-B
Turbiedad	UNT	2130-B
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	4500-Cl B
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /L	4500-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> E

\* APHA et al. 2005

## *Análisis estadístico*

Se realizó un diseño experimental con dos factores cruzados (concentración de solución y Tipo de Alcalinizante), un factor anidado (Dosis del alcalinizante anidado al tipo de alcalinizante) y tres covariables (pH, Dureza cálcica y Alcalinidad Total) que afectan la variable respuesta, permitiendo así detectar las verdaderas diferencias que presentan los tratamientos. Las variables de respuesta para este diseño fueron los índices de estabilización del pH (ISL, IFC, PPCC, IA, RL y IER) ya que proporcionan una evaluación integral del proceso de estabilización del pH, realizándose un diseño experimental para cada uno.

Combinando los diseños descritos anteriormente se obtiene el diseño experimental a emplear en el análisis donde se tienen dos factores cruzados denominados A con  $a$  niveles y B con  $b$  niveles, un factor anidado C con  $c$  niveles y tres covariables  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ , representados mediante el siguiente modelo estadístico:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \delta_j + \gamma_{k(j)} + (\alpha\delta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik(j)} + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon_{ijkl}$$
$$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, \dots, c \quad l = 1, 2, \dots, r$$

*Ecuación (17)*

Donde:

$y_{ijkl}$ : Medición de la variable respuesta.

$\mu$ : Media global.

$\alpha_i$ : Efecto debido al  $i$ -ésimo nivel del factor A.

$\delta_j$ : Efecto debido al  $j$ -ésimo nivel del factor B.

$\gamma_{k(j)}$ : Efecto debido al  $k$ -ésimo nivel del factor C anidado al  $j$ -ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\delta)_{ij}$ : Efecto debido a la interacción entre el  $i$ -ésimo nivel del factor A y el  $j$ -ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\gamma)_{ik(j)}$ : Efecto debido a la interacción entre el  $i$ -ésimo nivel del factor A y el  $k$ -ésimo nivel del factor C anidado al  $j$ -ésimo nivel del factor B.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ : Coeficientes que indican la dependencia de  $y$  con las covariables  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ , respectivamente.

$\varepsilon_{ijkl}$ : Error aleatorio con medio cero, distribución normal y varianza constante.

**Hipótesis de Investigación:** La hipótesis de investigación que se tiene para este estudio es que los índices difieren dependiendo de la concentración de aplicación, tipo de alcalinizante y dosis empleada.

### **Factores y niveles:**

- Factor A: Concentración de la solución  
Niveles: 1% y 4%
- Factor B: Tipo de Alcalinizante  
Niveles: Cal Hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) – Hidróxido de Sodio ( $\text{NaOH}$ ) – Bicarbonato de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) – Carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).
- Factor C anidado al factor B: Dosis (mg/L)



Niveles:

- 2, 4, 6, 8, 10 y 20 para los alcalinizantes Cal Hidratada e Hidróxido de Sodio.
- 10, 20, 50, 130, 200 y 250 para los alcalinizantes Bicarbonato de Sodio y Carbonato de Sodio.

**VARIABLES DE RESPUESTA:** Índice de estabilización del pH: ISL, IFC, PPCC, IA, RL y IER.

**COVARIABLES:** pH, Dureza cálcica y Alcalinidad.

Las pruebas estadísticas que se llevaron a cabo fueron las siguientes:

- **Pruebas de hipótesis sobre el efecto de los factores – ANOVA**

Las inferencias sobre los efectos de los factores dependen de la presencia o ausencia de la interacción. Primero se determina la significancia de la interacción de mayor orden antes de establecer cualquier significancia para los efectos individuales, ya que si la interacción de mayor orden es significativa entonces dará indicio que los factores guardan alguna relación y no pueden ser evaluados de manera independiente.

Las hipótesis nulas de interacción entre los factores están dadas por:

$H_0: (\alpha\delta)_{ij} = 0$ ; No existe una interacción entre los factores A y B.

$H_0: (\alpha\gamma)_{ik(j)} = 0$ ; No existe una interacción entre los factores A y C, este último anidado al factor B.

Las hipótesis nulas de los factores individuales están dadas por:

$H_0: \alpha_i = 0$ ; El efecto debido al factor A no es significativo.

$H_0: \delta_j = 0$ ; El efecto debido al factor B no es significativo.

$H_0: \gamma_{k(j)} = 0$ ; El efecto debido al factor C anidado al factor B no es significativo.

Las hipótesis nulas que las covariables no están relacionadas con la variable respuesta están dadas por:

$H_0: \beta_i = 0$ ; La  $i$ -ésima covariable no guarda relación con la variable respuesta.

- **Validación de supuestos del Modelo**

La validez de los análisis derivados del diseño experimental se apoya en unas suposiciones claves que de no ser satisfechas el análisis de varianza (ANOVA) puede conducir a conclusiones erróneas. Se supone que los errores experimentales aleatorios son independientes, siguen una distribución normal y tienen una varianza común para todos los grupos de tratamiento. Cualquier discrepancia entre los datos y una o más de estas suposiciones afecta las estimaciones de los efectos de los factores y las pruebas de significancia del análisis de varianza.

En la validación de los supuestos, se empleó la prueba de Anderson & Darling (1954) para evaluar la hipótesis nula  $H_0$ : Los errores se distribuyen de manera normal; mientras que la

prueba de Bartlett (1937) se empleó para evaluar el supuesto de homogeneidad de varianzas entre los tratamientos que viene dado por la hipótesis nula  $H_0$ : Los errores son homogéneos.

- **Pruebas de Comparación Múltiples**

El ANOVA únicamente permite contrastar la hipótesis general de que no existe interacción entre los factores y que no hay diferencias entre los niveles de cada uno de los factores evaluados; sin embargo, al rechazar las hipótesis nulas se debe determinar entre cuales combinaciones de los niveles existen diferencias significativas mediante alguna prueba de comparación múltiple (POSTANOVA), para lo cual se empleó el método de la Diferencia Significativa Honesta de Tukey (1952), que permite comparar todos los pares de tratamientos.

Los análisis de varianza (ANOVA), la validación de los supuestos del modelo y las pruebas de comparación múltiple, se realizaron empleando un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , por tanto si el valor-p asociado a cada una de las pruebas estadísticas realizadas es inferior a  $\alpha$  se dirá que existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, en caso contrario no se rechazará dicha hipótesis. Se empleó el software Minitab® Inc. versión 16 para realizar los análisis.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Identificación de los índices de mayor aplicabilidad para el control del proceso de estabilización del pH

Con relación a los índices de estabilización de mayor aplicabilidad para el control del proceso de estabilización del pH, la Tabla 4 presenta una síntesis de los índices que proporcionan información de la tendencia de deposición de la película de carbonato de calcio, detallando las principales características de cada uno, resaltando aspectos como la interpretación, utilidad y limitaciones, además de otras características como simplicidad y tiempo de respuesta.

**Tabla 4.** Resumen de las características de los índices que proporcionan información de la tendencia de deposición de la película de carbonato de calcio

ÍNDICE	ECUACIÓN	CARACTERÍSTICAS
	$ISL = pH - pH_s$ Ec.18	
	*Válido para pH entre 6.0 – 8.5 y alcalinidad total >50 mgCaCO <sub>3</sub> /L: $pH_s = pK_2 - pK_s + p[Ca^{2+}] + p[Alk_t] + 5pfm$ Ec.19	
	*Válido para pH >8.5 y alcalinidad total <50 mgCaCO <sub>3</sub> /L: $pH_s = pK_2 - pK_s + p[Ca^{2+}] + p[HCO_3^-] + 5pfm$ Ec.20	
	$pK_2 = 107,8871 + 0,03252849T - \frac{5151,79}{T} - 38,92561 \log_{10} T + \frac{563713,9}{T^2}$ Ec.21	
	$pK_s = 171,9065 + 0,077993T - \frac{2839,319}{T} - 71,595 \log_{10} T$ Ec.22	
<b>Índice de Saturación de Langelier (ISL)</b>	$pK_w = \frac{4471}{T} + 0,01706T - 6,0875$ Ec.23	<b>Utilidades:</b> Indicador de las condiciones de precipitación del carbonato de calcio.  <b>Limitaciones:</b> No siempre es fiable en la predicción de la formación de la capa de carbonato porque algunas aguas con un índice positivo pueden ser bastante corrosivas.  No es una forma universal de control de la corrosión. No predice la cantidad de CaCO <sub>3</sub> que precipitarán o si su estructura proporcionan resistencia a la corrosión. La capacidad de formación de la capa protectora depende de las propiedades del agua a resistir cambios en el valor del índice.
	$pfm = \left[ \frac{AI^{1/2}}{1 + I^{1/2}} \right] - 0,3I$ (Válido para $I < 0,5$ ) Ec.24	
ISL > 0, agua sobresaturada.	$A = 1,82 \times 10^6 (ET)^{-1,5}$ Ec.25	
ISL = 0, agua saturada (en equilibrio).	$E = \frac{60954}{T + 116} - 68,937$ Ec.26	
ISL < 0, agua insaturada.	$[HCO_3^-] = \frac{[Alk_t] + 10^{(pfm - pH)} - 10^{(pH + pfm - pK_w)}}{1 + 0,5 \times 10^{(pH - pK_2)}}$ Ec.27	
	pH en el sitio; p: Designa el $-\log_{10}$ de esa variable; $K_2$ : Constante de segunda disociación para el ácido carbónico a la temperatura del agua; $K_s$ : Constante de disociación de producto para la calcita; $[Ca^{2+}]$ : Calcio total, en g-mol/L; $[Alk_t]$ : Alcalinidad total, g-mol/L; $pfm$ : Coeficiente de actividad para especies monovalentes a temperatura especificada; T: Temperatura en grados Kelvin; E: Constante dieléctrica; I : Fuerza iónica	
	Para calcular I existen varias posibilidades: a) Cuando se dispone de un análisis mineral completo	

$$I = \frac{1}{2} \sum [X_i] Z_i^2 \quad \text{Ec.28}$$

[X<sub>i</sub>]: Concentración del componente i, moles-g/L; [Z<sub>i</sub>]: Carga de la especie i

b) Cuando solamente se dispone de la conductividad eléctrica (C: μS/cm)

$$I = 1,6 \times 10^{-5} * C \quad \text{Ec.29}$$

c) Cuando solamente se dispone de los sólidos disueltos totales (SDT: mg/L)

$$I = \frac{SDT}{40000} \quad \text{Ec.30}$$

### Índice de Fuerza de conducción de Mc Cauley (IFC)

IFC > 1, agua sobresaturada.

IFC = 1, agua saturada (en equilibrio).

IFC < 1, agua insaturada.

$$IFC = \frac{Ca^{+2} * CO_3^{-2}}{K_s * 10^{10}} \quad \text{Ec.31}$$

$$CO_3^{-2} = 0,94 * Alc_{HCO_3} * 10^{pH-10} \quad \text{Ec.32}$$

$$Alc_{HCO_3} = \frac{Alc_T - 5 * 10^{pH-10}}{1 + 0,94 * 10^{pH-10}} \quad \text{Ec.33}$$

$$K_s = 10^{-\left(171,9065 + 0,07799T - \frac{2839,319}{T} - 71,5951 \log_{10} T\right)} \quad \text{Ec.34}$$

Ca<sup>+2</sup>: Dureza cálcica (mgCaCO<sub>3</sub>/L); CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>: Concentración de carbonatos (mgCaCO<sub>3</sub>/L); pH: Potencial de ión hidrógeno; Alc<sub>HCO<sub>3</sub></sub>: Alcalinidad bicarbonática, mgCaCO<sub>3</sub>/l; Alc<sub>T</sub>: Alcalinidad total (mgCaCO<sub>3</sub>/L); K<sub>s</sub>: Producto de solubilidad de CaCO<sub>3</sub>; T: Temperatura en grados Kelvin

**Utilidades:** Mide la tendencia de deposición de la película de carbonato de calcio en el SDA.

**Limitaciones:** No implica directamente efectos relacionados con la corrosión, los cuales deben de reportarse por aparte.

### Potencial de Precipitación de Carbonato de Calcio (PPCC)

PPCC > 0, denota sobresaturación y los mgCaCO<sub>3</sub>/L que deben precipitar.

PPCC < 0, indica insaturación y cuanto CaCO<sub>3</sub> debe disolverse.

$$PPCC = Alk_i - Alk_{eq} \quad \text{Ec.35}$$

$$Alk_{eq} = \frac{t_{eq}}{p_{eq}} (Acy_i - s_{eq}) - s_{eq} \quad \text{Ec.36}$$

$$Acy_i = \frac{(Alk_i + s)}{t} p + s \quad \text{Ec.37}$$

$$p = \frac{2[H^+] + K_1}{K_1} \quad \text{Ec.38}$$

$$s = [H^+] - \frac{K_w}{[H^+]} \quad \text{Ec.39}$$

$$t = \frac{2K_2 + [H^+]}{[H^+]} \quad \text{Ec.40}$$

$$[H^+] = 10^{-pH} \quad \text{Ec.41}$$

$$K_1 = 10^{-\left(356,3094 + 0,060919T - \frac{2183437}{T} - 126,8339 \log_{10} T + \frac{1684915}{T^2}\right)} \quad \text{Ec.42}$$

$$K_w = 10^{-\left(\frac{4471}{T} + 0,0170T - 6,0875\right)} \quad \text{Ec.43}$$

**Utilidades:** Indica la masa teórica aproximada del CaCO<sub>3</sub> que podría precipitar sobre la superficie de una tubería.

**Limitaciones:** Dificultad en la determinación de las dosis químicas que se aplican para obtener un agua con una PPCC determinado.

$$K_2 = 10^{-\left(107,8871+0,0325284T-\frac{515179}{T}-38,9256 \log_{10}T+\frac{5637139}{T^2}\right)} \quad \text{Ec.44}$$

$$K_s = 10^{-\left(171,9065+0,07799T-\frac{2839,319}{T}-71,595 \log_{10}T\right)} \quad \text{Ec.45}$$

Los términos de  $t_{eq}$ ,  $p_{eq}$ ,  $s_{eq}$  corresponden a las ecuaciones p, s, t utilizando la concentración de los iones  $[H^+]_{eq}$  al final.

$[H^+]_{eq}$  se obtiene a través de un proceso iterativo de ensayo y error obteniendo así la  $alk_{eq}$  mediante la siguiente ecuación:

$$2[Ca^{+2}]_i - Alk_i = \frac{2K_s r_{eq} p_{eq}}{t_{eq} A_{cy_i} - s_{eq}} - \frac{t_{eq} (A_{cy_i} - s_{eq})}{p_{eq}} + s_{eq} \quad \text{Ec.46}$$

$Alk_i$ : Alcalinidad inicial (mgCaCO<sub>3</sub>/L);  $Alk_{eq}$ : Alcalinidad de equilibrio (mgCaCO<sub>3</sub>/L); pH in situ; Temperatura (°C); Calcio (mgCa<sup>+2</sup>/L)

**Fuente:** RAS, 2000; McNeill & Edwards, 2001; Benefield & Morgan, 2002; Schock, 2002; Varó Galván et al. 2004; APHA et al. 2005; Imran et al. 2005; Trujillo et al. 2008; De Sousa et al. 2010; De Moel et al. 2013.

El ISL e IFC indican si el agua se encuentra en equilibrio respecto a la formación de la película de CaCO<sub>3</sub>, siendo útiles inicialmente para proporcionar las condiciones de sobresaturación en un SDA y aplicados a aguas blandas que normalmente se derivan de las cuencas altas (concentraciones de alcalinidad y dureza < 50mgCaCO<sub>3</sub>/L) (Gray, 2008; De Sousa et al. 2010; Birnhack et al. 2011; De Moel et al. 2013).

Los resultados de estos dos índices de estabilización deberían ser positivos, lo que indicaría que el mantenerlos en el tiempo representaría un impacto en la resistencia a problemas como la corrosión (Loewenthal et al. 2004; Imran et al. 2005). En muchos casos, el ISL se ha utilizado inadecuadamente como solución para los problemas de corrosión (McNeill & Edwards 2001; Imran et al. 2005) debido a que éste no tiene en cuenta la influencia de otros factores que aportan corrosión como los iones cloruro y sulfato, la concentración de oxígeno disuelto, la velocidad de flujo, entre otros. (Loewenthal et al. 2004).

Otra limitación de estos índices es que no predicen la cantidad de CaCO<sub>3</sub> que precipitará en el SDA, por lo que autores como Imran et al. (2005), Birnhack et al. (2011) y De Moel et al. (2013) recomiendan que su aplicación sea acompañada con el índice PPCC, el cual representa la cantidad teórica aproximada del CaCO<sub>3</sub> que podría precipitar sobre la superficie de una tubería. Autores como Merrill & Sanks (1977) y Loewenthal et al. (2004), recomiendan valores de PPCC entre 4 – 10 mg/L, aclarando que cada SDA posee características propias y por lo tanto los valores adecuados se deben obtener realizando ensayos in situ.

La Tabla 5 presenta una síntesis de los índices que dependen de la influencia del material, detallando las principales características de cada uno, resaltando aspectos como la interpretación, utilidad y limitaciones, además de otras características como simplicidad y tiempo de respuesta.

**Tabla 5.** Resumen de las características de los índices que dependen de la influencia del material y los métodos aplicados en la evaluación de la estabilización del pH

ÍNDICE	ECUACIÓN	CARACTERÍSTICAS
<p><b>Índice de Agresividad (IA)</b></p> <p>Si IA &lt; 10, agua muy agresiva. Si 10 &lt; IA &lt; 12, agua moderadamente agresiva. Si IA &gt; 12, agua no agresiva.</p>	$AI = pH + \log(A * H) \quad \text{Ec.47}$ <p>pH: Potencial de ión hidrógeno; A: Alcalinidad total, (mgCaCO<sub>3</sub>/L); H: Dureza cálcica (mgCaCO<sub>3</sub>/L)</p>	<p><b>Utilidades:</b> Estima la tendencia del agua a deteriorar la estructura de la tubería.</p> <p>Se aplica en tuberías de asbesto cemento.</p> <p><b>Limitaciones:</b> No es indicador de tendencia para precipitar el CaCO<sub>3</sub>.</p>
<p><b>Relación de Larson (RL)</b></p> <p>Concentraciones (mol/L), los resultados representados en potencial de corrosión: &lt;0.2, No existe potencial. 0.2 – 0.4, pequeño potencial. 0.4 – 0.5, ligero potencial. 0.5 – 1.0, potencial promedio. &gt;1, Fuerte potencial.</p>	$RL = \frac{[Cl^-] + 2 * [SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad \text{Ec.48}$ $[HCO_3^-] = \frac{[Alk_t] + 10^{(pfm - pH)} - 10^{(pH + pfm - pKw)}}{1 + 0,5 \times 10^{(pH - pK_2)}} \quad \text{Ec.49}$ $pKw = \frac{4471}{T} + 0,01706T - 6,0875 \quad \text{Ec.50}$ <p>* La variable pfm se determina a partir de las ecuaciones del ISL</p> <p>Cl<sup>-</sup>: Cloruros; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: Sulfatos; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Bicarbonatos; Alk<sub>t</sub>: Alcalinidad total (mgCaCO<sub>3</sub>/L).</p>	<p><b>Utilidades:</b> Representa cuantitativamente la corrosividad del agua, debido a los iones cloruro y sulfato. Se aplica en tuberías metálicas.</p> <p><b>Limitaciones:</b> Se recomienda ser utilizado para aguas con media a alta alcalinidad (&gt;50 mgCaCO<sub>3</sub>/L).</p>
<p><b>Índice de Estabilidad de Ryznar (IER)</b></p> <p>Si IER &lt; 6.5, agua incrustante. Si 6.5 &lt; IER &lt; 7, agua cercana al equilibrio. Si IER &gt; 7, agua corrosiva.</p>	$IER = 2pH_s - pH \quad \text{Ec.51}$ <p>*Aplican las mismas ecuaciones del ISL</p> <p>Alcalinidad total (mgCaCO<sub>3</sub>/L); Dureza cálcica (mgCaCO<sub>3</sub>/L); Sólidos disueltos totales (mg/L); Conductividad eléctrica (µS/cm) pH en el sitio; Temperatura en el sitio.</p>	<p><b>Utilidades:</b> Determina el carácter corrosivo o incrustante de las aguas. Se aplica en tuberías de acero.</p> <p><b>Limitaciones:</b> Tiende a favorecer aguas de mayor dureza y alcalinidad total. No ofrece ventajas tangibles comparadas con otros índices para calcular el estado de saturación y potencial de deposición del CaCO<sub>3</sub></p>

Algunos de los índices tienen aplicación para tipos específicos de materiales de la tubería del SDA, tales como el IA, RL e IER; el IA se basa en el pH y la solubilidad del carbonato de calcio, considerado una forma simplificada del ISL, siendo una herramienta de gran utilidad en la selección de materiales del SDA o en las opciones de tratamiento para el control de la corrosión; sin embargo, se debe tener en cuenta que se utiliza como medida de

tendencia del agua a deteriorar la estructura de tuberías de asbesto cemento (Schock, 2002; Imran et al. 2005; Trujillo et al. 2008).

Los índices RL e IER son utilizados para aguas con mayor concentración de dureza y alcalinidad (Schock, 2002; Trujillo et al. 2008); la RL se desarrolló a partir del comportamiento corrosivo que aportan los cloruros y sulfatos con respecto a las propiedades protectoras del bicarbonato, siendo aplicable para tuberías metálicas (Schock, 2002; Imran et al. 2005) y el IER es comúnmente utilizado, pero no ofrece ventajas tangibles comparadas con otros métodos para calcular el estado de saturación del carbonato de calcio y su potencial de deposición (Schock, 2002) siendo además utilizado para tuberías de acero (APHA et al. 2005; Imran et al. 2005; Trujillo et al. 2008; De Sousa et al. 2010). Otros índices que son aplicados directamente en el SDA se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resumen de las características de los índices que son aplicados directamente en el SDA

ÍNDICE	ECUACIÓN	CARACTERÍSTICAS
<p><b>Relación de Larson Modificado (RLM)</b></p> <p>Un valor por debajo de 0,5 no son corrosivas y aquellos con un valor por encima son corrosivos.</p>	$RLM = \frac{(Cl^- + SO_4^{-2} + Na^+)^{1/2}}{Alcalinidd} \left( \frac{T}{25} \right) TRH$ <p style="text-align: right;">Ec.52</p> <p>Cl<sup>-</sup>: Concentración de cloruros (mg CaCO<sub>3</sub>/L); SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>: Concentración de sulfatos (mgCaCO<sub>3</sub>/L); Na<sup>+</sup>: Concentración de sodio (mgCaCO<sub>3</sub>/L); T: Temperatura (°C); TRH: Tiempo de retención hidráulico (Días).</p>	<p><b>Utilidades:</b> Contiene factores que influyen en la corrosión (alcalinidad total, pH y edad del agua-TRH). Evalúa el potencial de corrosión.</p> <p><b>Limitaciones:</b> El término de corrosión, en este contexto, se refiere a la tendencia a causar problemas de agua de color. Su aplicación es directamente sobre el SDA.</p>
<p><b>Índice de Corrosión de Riddick (ICR)</b></p> <p>Si ICR &lt;25, no es corrosivo. Si 26 &lt; ICR &lt; 50, moderadamente corrosivo. Si 51 &lt; ICR &lt; 75, son corrosivos. Si ICR &gt;75, son muy corrosivos.</p>	$ICR = \frac{75}{Alc} \left\{ CO_2 + \frac{1}{2} [Dur - Alc] + Cl^- + 2N \right\} * \left[ \frac{10}{SiO_2} \right] \left[ \frac{OD+2}{ODsat} \right]$ <p style="text-align: right;">Ec.53</p> <p>CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono (mg/L); Dur: Dureza total (mgCaCO<sub>3</sub>/L); Alc: Alcalinidad (mgCaCO<sub>3</sub>/L); Cl<sup>-</sup>: Cloruros (mgCl<sup>-</sup>/L); N: Nitratos (mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L); SiO<sub>2</sub>: Óxido de Silicio (mgSiO<sub>2</sub>/L); OD: Oxígeno disuelto (mg/L); OD sat: Saturación de OD.</p>	<p><b>Utilidades:</b> Introduce factores como OD, ion Cl<sup>-</sup> y dureza total. Intenta predecir la cantidad de CaCO<sub>3</sub> que se precipitará.</p> <p><b>Limitaciones:</b> Se aplica para aguas blandas. Requiere análisis específicos como silicatos y saturación de OD. Su aplicación es directamente sobre el SDA.</p>

La RLM y el ICR consideran otras variables que dependen tanto del equilibrio químico del agua como del transporte de la misma (tiempo de retención hidráulico, CO<sub>2</sub>, sodio, nitratos, OD y silicatos, entre otras) (Imran et al. 2005; Trujillo et al. 2008; De Sousa et al. 2010). Su principal uso es un indicador de las condiciones adecuadas para la precipitación de la película de carbonato de calcio; sin embargo, no es una forma universal de corrosión y no predice la cantidad de carbonato de calcio que precipitaría en el SDA.



La Tabla 7 muestra las características de los modelos cuantitativos aplicados para la medición y control del proceso de estabilización del pH.

**Tabla 7.** Resumen de las características de los modelos cuantitativos aplicados en la evaluación de la estabilización del pH

ÍNDICE	ECUACIÓN	CARACTERÍSTICAS
<b>Diagramas de Caldwell-Lawrence Modificados</b>	Método gráfico que requiere como datos de entrada: pH, dureza cálcica (mgCaCO <sub>3</sub> /L), Magnesio (mgCaCO <sub>3</sub> /L), Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L), temperatura (°C) y fuerza iónica para cuyo cálculo se utilizan las ecuaciones aplicadas en el ISL	<b>Utilidades:</b> Determina el equilibrio de saturación del CaCO <sub>3</sub> y estima las dosis químicas de alcalinizantes.  <b>Limitaciones:</b> Metodología de ensayo y error, a menudo tedioso. Los resultados deben verificarse en campo.
<b>Método de Mojmir-Mach</b>	Empleando herramientas de informática, se fundamenta en el ISL y en el gráfico de Tillmans el cual incorpora la fuerza iónica y considera la aportación de los denominados iones ajenos (cationes y aniones presentes en el agua diferentes al calcio, bicarbonatos, carbonatos y protones).  El sistema de coordenadas representa las concentraciones determinadas de [H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ] y [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] obtenidas a partir de la acidez y alcalinidad del agua respectivamente, incluyendo los iones ajenos en el equilibrio de saturación.	<b>Utilidades:</b> Determina la agresividad de un agua mediante la acidez y alcalinidad total. Determina la concentración de hidróxido o CaCO <sub>3</sub> por litro, que se requiere adicionar para obtener un agua en equilibrio químico.  <b>Limitaciones:</b> Requiere de software especializado como AgrInc_Agua 2.0, Stasoft 4, entre otros. Los resultados deben verificarse en campo.

Como se observa en la Tabla 7, los diagramas de Caldwell-Laurence modificados y Mojmir-Mach, los cuales determinan el equilibrio de saturación del CaCO<sub>3</sub> y la agresividad del agua; estos métodos permiten determinar las dosis de alcalinizante requeridas para generar aguas con tendencia a precipitar CaCO<sub>3</sub> (Merrill & Sanks, 1977; RAS, 2000); sin embargo, se requiere un software especializado, con los que comúnmente no cuentan las plantas de potabilización, para obtener resultados en corto tiempo y verificarlos con aplicaciones prácticas (Benefield & Morgan, 2002; Trujillo et al. 2008).

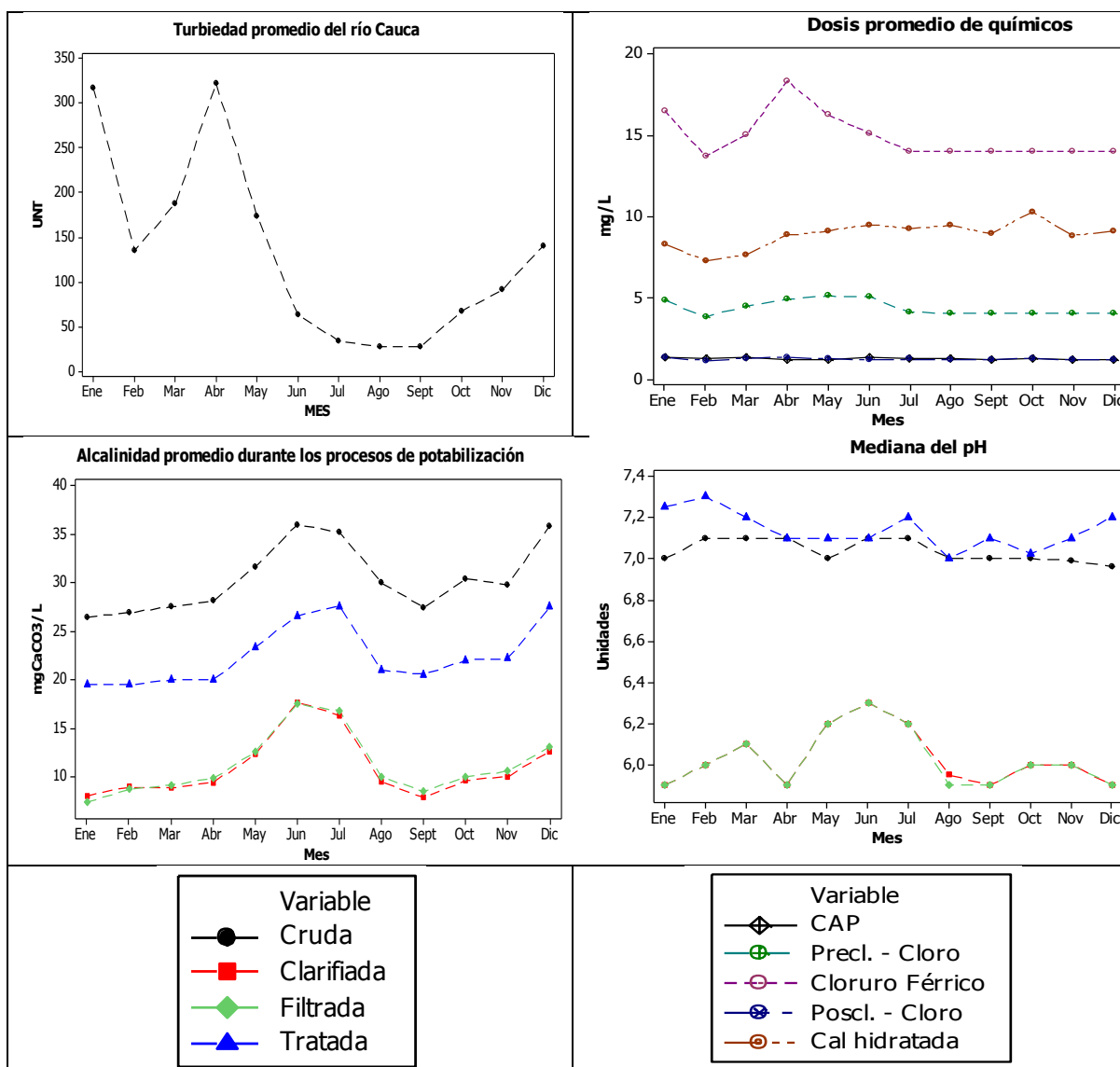
De acuerdo con el análisis anterior de cada índice, su aplicación desde las plantas de potabilización, las características de los materiales del SDA de la ciudad de Santiago de Cali y la información de variables comúnmente monitoreadas en las plantas, los índices que fueron seleccionados para ser determinados con los datos históricos y las jornadas de muestreo fueron los del grupo 1 y 2, los que presentan tendencia a precipitar carbonato de calcio (ISL, IFC y PPCC) y los que son aplicados a materiales específicos de tuberías (IA, RL e IER).

## 6.2 Determinación de los índices potencialmente aplicables para el control del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca

### 6.2.1 Identificación del efecto de la adición de los químicos (coagulante, polímero, adsorbente, desinfectante y estabilizador de pH) usados en los procesos de tratamiento para potabilización



La Figura 6 presenta el comportamiento de turbiedad (UNT) del agua cruda, dosis de químicos y su efecto en la alcalinidad total (mgCaCO<sub>3</sub>/L) y pH (unidades) durante los procesos de potabilización.



**Figura 6.** Comportamiento de turbiedad del río Cauca, dosis de químicos y su efecto en la alcalinidad y pH durante los procesos de potabilización. Datos históricos horarios año 2012

La Figura 6 muestra que la turbiedad del río Cauca presenta una alta variabilidad asociada principalmente a las condiciones climáticas, incrementando la turbiedad en temporadas de invierno ocasionado por la suspensión de sólidos (Rodríguez et al. 2010; Montoya et al. 2011; Arjona-Rodríguez et al. 2012), arrastre de descargas de vertimientos domésticos e industriales, escorrentía agrícola y minera y sedimentos, que pueden causar consumo de la alcalinidad total del río (Pérez-Vidal et al. 2014; Bueno-Zabala et al. 2014).

Se observa también que los picos asociados a la turbiedad generan un efecto directo sobre la dosificación de químicos, principalmente en los procesos de precloración y coagulación, lo que coincide con el estudio de Montoya et al. (2011) encontrando una correlación significativa al 5%. Dichas adición de químicos generan un consumo de alcalinidad total y disminución del pH en los procesos posteriores para la potabilización (clarificación y filtración). Finalmente, el agua potable cumple el 100% de las veces la normatividad nacional en términos de pH manteniendo valores con una mediana entre 7.0 – 7.3 unidades; sin embargo, los bajos niveles de alcalinidad total  $< 40\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  corresponden a aguas caracterizadas como corrosivas (Merrill & Sanks, 1977; Varó Galván et al. 2004), lo que ratifica la necesidad de evaluar y optimizar el último proceso de potabilización y/o el proceso de coagulación con cal primaria o cambio de coagulante.

### **6.2.2 Determinación de los índices de mayor aplicabilidad**

La Tabla 8 muestra el resumen del análisis estadístico de indicadores de tendencia central de los registros históricos suministrados por EMCALI EICE ESP correspondiente al periodo 2010 – 2012 y los monitoreos de calidad del agua tratada del río Cauca.

De acuerdo con la Tabla 8 y teniendo en cuenta que el SDA de la ciudad de Santiago de Cali, está conformado por PVC (51.6%), asbesto cemento – AC (31.9%), hierro (fundido, dúctil, galvanizado) (11.5%), cilindros de acero revestidos en concreto – CCP (2.8%), acero (1.2%) y Polietileno de alta densidad (1%), se debe resaltar que el tramo de tubería de AC es el que presenta el mayor número de daños y se observa que los valores de la mediana del pH son menores a los recomendados para este tipo de tuberías (WHO, 2011).

La alcalinidad total, dureza total y cálcica del agua tratada del río Cauca, presentan concentraciones menores de  $40\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  que no promueven la formación de la película de carbonato de calcio en el SDA, lo que indica la necesidad de buscar estrategias para incrementar estos valores, ajustando el pH de acuerdo a los materiales utilizados en cada SDA (Merrill & Sanks, 1977; Varó Galván et al. 2004; WHO, 2011).

Los valores de calcio y magnesio que se encuentran relacionados con la dureza total, muestran que hace falta incrementar la concentración de calcio hasta aproximadamente  $16\text{mg/L}$  según lo recomendado por Merrill & Sanks, (1977); mientras que las concentraciones promedio de magnesio, evitan los problemas ocasionados por la formación de incrustaciones de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  en tuberías domésticas de agua caliente (RAS, 2000).

**Tabla 8.** Resumen estadístico de indicadores de tendencia central para las variables del proceso de estabilización del pH y determinación de índices.

Variable	Media	Mín.	Máx.	Q <sub>1</sub>	Med.	Q <sub>3</sub>	Valor recomendado	Fuente
pH (unidades)	<b>Históricos</b>						*Tub. Hierro: 6.8 – 7.3 *Tub. Plomo y Cobre: 8.0 – 8.5 *Tub. Latón (Aleación Cobre y Zinc): <8.3 *Tub. Hormigón y Zinc: >8.5	WHO, 2011
	-	6.50	8.20	6.94	7.17	7.46		
	<b>Monitoreos</b>							
	-	6.63	8.11	7.01	7.54	7.66		
Alcalinidad Total (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	<b>Históricos</b>						Alcalinidad > 40 para la formación de la película de carbonato de calcio	Merrill & Sanks, 1977
	21,08	11,17	34,61	18,6	21,02	24,01		
	<b>Monitoreos</b>							
	21,47	11,90	29,40	19,73	21,40	22,83		
Dureza Total (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	<b>Históricos</b>						40 – 60	RAS, 2000
	45,76	19,73	71,37	19,73	45,55	51,88		
	<b>Monitoreos</b>							
	46,76	35,40	57,00	44,73	46,75	49,70		
Dureza Cálctica (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	<b>Históricos</b>						>40 para la formación de la película de carbonato de calcio	Merrill & Sanks, 1977
	33,14	8,01	28,65	28,65	33,30	38,00		
	<b>Monitoreos</b>							
	32,46	17,60	38,80	30,15	33,45	34,75		
Calcio (mg/L)	<b>Históricos</b>						>16 para la formación de la película de carbonato de calcio	Merrill & Sanks, 1977
	13,29	3,21	21,66	11,49	13,35	15,20		
	<b>Monitoreos</b>							
	13,01	7,05	15,55	12,08	13,41	13,93		
Magnesio (mgMg <sup>+2</sup> /L)	<b>Históricos</b>						3-100 para minimizar la formación de hidróxido de magnesio a temperaturas elevadas	RAS, 2000
	3,06	0,46	6,15	2,28	3,00	3,77		
	<b>Monitoreos</b>							
	3,47	1,87	5,22	3,09	3,46	3,75		
Temperatura (°C)	<b>Históricos</b>						Afecta variables como: solubilidad del oxígeno disuelto (OD), las propiedades del agua (viscosidad y la movilidad de iones), tasa de lixiviación de metales, etc,	McNeill & Edwards, 2001
	-	18,0	29,8	21,8	22,6	23,6		
	<b>Monitoreos</b>							
	-	22,70	25,70	23,43	23,95	24,45		
Cloruros (mg/L)	<b>Históricos</b>						>50 cloruros o sulfatos son considerados como potencialmente corrosivos	Loewenthal et al. 2004; Gray, 2008
	15,74	2,97	27,45	12,48	16,23	18,42		
	<b>Monitoreos</b>							
	16,43	14,60	20,16	14,60	15,92	17,36		
Sulfatos (mg/L)	<b>Históricos</b>						Un incremento de conductividad > 50% en el agua, indica un cambio en la cantidad de SDT que incluyen los cloruros y el sodio	MPS & MAVDT, 2007
	13,56	3,05	49,76	8,52	10,39	17,98		
	<b>Monitoreos</b>							
	12,47	10,00	14,90	11,33	12,55	13,55		
Conductividad (µs/cm)	<b>Históricos</b>						Un incremento de conductividad > 50% en el agua, indica un cambio en la cantidad de SDT que incluyen los cloruros y el sodio	MPS & MAVDT, 2007
	127,4	96,9	212,0	96,9	126,7	134,6		
	<b>Monitoreos</b>							
	143,4	129,9	151,5	138,7	145,5	147,9		

Los cloruros y sulfatos que tienden a fomentar la corrosión mediante la formación de una película de óxido (Loewenthal et al. 2004), presentan concentraciones menores a las establecidas (50 mg/L según Gray 2008) para ser consideradas corrosivas. Este comportamiento se relaciona con la conductividad ya que ésta representa una parte de los cloruros y al contener bajas concentraciones, los niveles de conductividad no superan los 1000µsiemens/cm establecido en la Resolución 2115 de 2007 (Imran et al. 2005; MPS & MAVDT, 2007).

Los resultados de la determinación de los índices seleccionados tanto para los datos históricos como los monitoreos, son presentados en la Tabla 3, encontrándose que el agua presenta condiciones insaturadas respecto al CaCO<sub>3</sub> con tendencia a la corrosión.

La Tabla 9 muestra los resultados de la determinación de los índices de estabilización seleccionados, encontrándose que el agua presenta condiciones insaturadas respecto al CaCO<sub>3</sub> con tendencia a la corrosión.

**Tabla 9.** Comportamiento de Índices de estabilización para el agua tratada del río Cauca.

Índice	Indicadores de tendencia central						Interpretación
	Media	Mín.	Máx.	Q <sub>1</sub>	Mediana	Q <sub>3</sub>	
ISL	<b>Históricos</b>						Agua insaturada con CaCO <sub>3</sub>
	-1,7	-3,8	0,24	-2,0	-1,7	-1,4	
<b>Monitoreos</b>							
-1,4	-2,4	-0,7	-1,8	-1,2	-1,1		
IFC	<b>Históricos</b>						Agua insaturada con tendencia a disolver CaCO <sub>3</sub>
	0,01304	0,00007	0,10131	0,00470	0,00802	0,01682	
<b>Monitoreos</b>							
0,05133	0,00177	0,16942	0,00983	0,03986	0,08640		
PPCC	<b>Históricos</b>						No precipita CaCO <sub>3</sub>
	-12,3	-73,4	0,2	-13,6	-9,6	-7,0	
<b>Monitoreos</b>							
-8,6	-20,1	-3,4	-12,3	-6,3	-5,2		
IA	<b>Históricos</b>						Agua moderadamente agresiva
	10,0	7,9	11,9	9,7	9,9	10,3	
<b>Monitoreos</b>							
10,3	9,3	11,0	9,9	10,4	10,6		
RL	<b>Históricos</b>						Agua con fuerte potencial de corrosión
	1,8	0,8	4,9	1,4	1,7	2,1	
<b>Monitoreos</b>							
1,9	1,2	2,9	1,5	1,8	2,3		
IER	<b>Históricos</b>						Agua corrosiva
	10,6	8,3	13,6	10,2	10,6	10,8	
<b>Monitoreos</b>							
10,3	9,5	11,7	9,8	10,0	10,7		

Según el ISL, el agua es insaturada (valores negativos), debido a la baja alcalinidad del agua (Tam & Elefsiniotis, 2009; Wilczak et al. 2010). El máximo ISL determinado con los datos históricos (0.24), estuvo relacionado con un agua tratada con pH aproximado de 8.8 unidades. Mientras el RAS (2000) reglamenta un ISL de 0.2, Varó Galván et al. (2004) sugieren un valor inferior a 0,5 y Imran et al. (2005) y De Sousa et al. (2010), un valor entre 0.2 - 1.0.

El IFC también clasifica el agua como insaturada. Según Benefield & Morgan (2002), los valores bajos de calcio y carbonatos no permiten llegar al equilibrio ni mantener una capacidad buffer. Tanto el ISL como el IFC son útiles para proporcionar las condiciones de saturación respecto al  $\text{CaCO}_3$ ; sin embargo, no predicen la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  que se precipitará en el SDA, siendo recomendable su uso de manera complementaria con el PPCC (Imran et al. 2005; Birnhack et al. 2011).

Los valores negativos del PPCC indican que el  $\text{CaCO}_3$  no tiende a precipitarse; el valor máximo presentado (0.2) correspondió a un agua con alcalinidad de  $32.3 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ , la cual se encuentra dentro del rango para la alcalinidad de equilibrio ( $\text{Alk}_{\text{eq}}$ :  $27.3 - 36.7 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ) y un pH superior al pHs ( $8,7 - 9,0$  unidades) siendo este mismo valor el que presentó un ISL positivo. Merrill & Sanks (1977) y Loewenthal et al. (2004) recomiendan que se deben generar valores de PPCC entre  $4 - 10 \text{ mg/L}$ , lo que se lograría si el agua tratada del río Cauca alcanzara una alcalinidad promedio entre  $34 - 44 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ .

El IA presentó valores cercanos a 10.0, lo que permite clasificar el agua como moderadamente agresiva ( $10 - 12$ ) según Tam & Elefsiniotis, (2009) debido a la baja alcalinidad al final de la potabilización.

Con base en la RL, Trujillo et al. (2008) y Agatemor & Okolo (2008), muestran que el bajo nivel de bicarbonatos en relación con los cloruros y sulfatos, es un factor importante que influye en la tendencia corrosiva del agua, sugiriéndose un RL entre  $0,2 - 0,3$  (expresando las variables en  $\text{mol/L}$ ), promoviendo características de alcalinidad total y dureza cálcica de  $30.5 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$  (Melidis et al. 2007). El agua tratada del río Cauca por presentar concentraciones de alcalinidad por debajo de  $40 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ , presentó valores promedio de RL entre históricos y monitoreos, de casi el doble del límite que clasifica el agua con fuerte potencial de corrosión para las tuberías metálicas, lo que indica la necesidad de incrementar la alcalinidad total pues las concentraciones de cloruros y sulfatos no presentan comportamiento de aguas corrosivas.

Según el IER, el agua es corrosiva para las tuberías de acero; sin embargo, debido a que este material representa solo el 1.2% del SDA de Santiago de Cali, se sugiere no emplearlo, además no es aplicable a aguas con baja alcalinidad (De Sousa et al. 2010).

### **6.2.3 Identificación de opciones para controlar y evaluar el proceso de estabilización del pH**

Autores como Varó Galván et al. (2004) indican que aún no existe un índice de estabilización de pH que sea aplicable universalmente, así como Imran et al. (2005) y De Sousa et al. (2010) plantean que no se ha desarrollado algún índice que represente el comportamiento global del agua en un SDA. En el caso del SDA de la ciudad de Santiago de Cali, los índices ISL, IFC, PPCC, IA, RL e IER pueden ser empleados en la planta de potabilización evaluada; sin embargo, la determinación de PPCC requiere un proceso iterativo de ensayo y error para obtener las condiciones de equilibrio al no contar con la aplicación de un software especializado.

El ISL y el IFC tienen una relación tenue con las tasas reales de corrosión en los SDA pero aún no se descarta su importancia en el proceso de estabilización, ya que son indicadores de

saturación del agua respecto al  $\text{CaCO}_3$ , que al mantener un cambio sostenido en el pH tendría un impacto definitivo en la resistencia a la corrosión de las tuberías viejas (Imran et al. 2005), pero no deben utilizarse para ningún otro propósito.

El IA indica las condiciones del agua en las tuberías de AC; este material es uno de los de mayor aplicación en los SDA y ocasionan mayores daños debido a las características químicas del agua como aguas blandas y los suelos donde se instalan (Hu & Hubble, 2007; Pérez-Vidal et al. 2012; Ahmadi et al. 2014).

Los tubos de AC favorecen los procesos de lixiviación de metales, lo que indica la necesidad de ajustar el pH a valores mayores a 8.5 unidades según lo recomendando por la WHO (2011); este ajuste no causaría problemas de incrustación de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  en altas temperaturas, ya que las concentraciones promedio de magnesio en este tipo de agua (3.06 mg/L) se encuentran dentro del rango admisible (RAS, 2000).

Al propiciar mejores condiciones para la formación de la película de  $\text{CaCO}_3$  para el SDA de Santiago de Cali, se podrían aplicar los índices RL e IER ya que actualmente no deben ser empleados por no ser recomendables para aguas con baja alcalinidad (Benefield & Morgan 2002; Varó Galván et al. 2004). Los demás índices como RLM e ICR deberan ser incluidos en futuros análisis en el SDA ya que consideran otras variables como el tiempo de retención hidráulico,  $\text{CO}_2$ , sodio, nitratos, OD y silicatos (Imran et al. 2005; Trujillo et al. 2008; De Sousa et al. 2010).

Como estrategias de mejoramiento del proceso de estabilización y de prevención de problemas en el SDA, se llevó a cabo el objetivo 3 evaluando otros alcalinizantes para promover la formación de la película de carbonato de calcio en el SDA.

### **6.3 Evaluación a escala laboratorio de la estabilización del pH del agua tratada del río Cauca con diferentes alcalinizantes.**

#### **6.3.1 Análisis comparativo de la aplicación de los diversos alcalinizantes de pH**

Para el proceso de la estabilización del pH, existen varios tipos de alcalinizantes los cuales incluyen la neutralización con una base fuerte (cal hidratada y soda cáustica) y la neutralización con un carbonato alcalino ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$ ). La Tabla 10 presenta las principales características de los alcalinizantes más empleados en el proceso de estabilización agrupadas por aspectos técnicos, de salud y económicos.

La Tabla 10 muestra que la cal hidratada y el hidróxido de sodio son bases fuertes que aportan mayor alcalinidad total directamente de los iones  $\text{OH}^-$ ; sin embargo, no aportan capacidad buffer al sistema, lo que indica que se podran necesitar mayores dosis que proporcionen capacidad buffer al agua para evitar la disminución del pH en el SDA (Torres et al. 2008). Para el caso de los bicarbonatos y carbonatos ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) por estar presentes en forma de sales, aportan menor alcalinidad total pero sí capacidad buffer mediante los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  (Torres et al. 2008; Furtado et al. 2011).


**Tabla 10.** Aspectos técnicos, de salud y económicos de los alcalinizantes utilizados para la estabilización del pH

Aspectos		ALCALINIZANTE				
		Cal Hidratada – Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Sodio – NaOH	Bicarbonato de Sodio – NaHCO <sub>3</sub>	Carbonato de Sodio – Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio – CaCO <sub>3</sub>
Técnicos	Química	Base fuerte	Base fuerte	Sal formada por una base fuerte (NaOH) y un ácido débil (H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Sal formada por el bicarbonato de sodio y una base fuerte (NaOH)	Sal formada por el ácido débil (H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) y una base fuerte (Ca(OH) <sub>2</sub> )
	Aniones que aportan Alcalinidad total por cada 1mol de producto adicionado	2 equivalentes OH <sup>-</sup>	1 equivalente OH <sup>-</sup>	1 equivalente HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2 equivalentes CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	2 equivalentes CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
	Aporte de Alcalinidad Total (como CaCO <sub>3</sub> ) por mg/L de producto adicionado*	1.35	1.25	0.60	0.94	1.00
	Aporte de capacidad buffer	0 equivalentes	0 equivalentes	1 equivalente HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2 equivalentes CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	2 equivalentes CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
	Aporte de Dureza	Aporta dureza cálcica	No aporta dureza			Aporta dureza cálcica
	Cationes aportados al agua por cada 1mol de producto adicionado**	2 equivalentes Ca <sup>+2</sup>	1 equivalente Na <sup>+1</sup>	1 equivalente Na <sup>+1</sup>	2 equivalentes Na <sup>+1</sup>	2 equivalentes Ca <sup>+2</sup>
	Almacenamiento	Tiende a ser un compuesto inestable en la presencia de humedad y dióxido de carbono CO <sub>2</sub> .  Deben ubicarse lejos de elementos combustibles como Carbón activado.	Preferible almacenar en polietileno de alta densidad y cerrado herméticamente.  Debido a la posibilidad de generación de hidrógeno inflamable y combustible, deben revisarse las líneas de conducción eléctrica y prohibirse fumar en zonas de almacenamiento y manejo.  Separado de ácidos fuertes, metales o alimentos.	Ambientes con temperatura inferior a 40°C.  Debe ubicarse lejos de ácidos, productos químicos de alta toxicidad y productos con olores fuertes que lo puedan impregnar.  Se recomiendan hacer arrumes con máximo 3 toneladas de producto.	Lugar fresco, seco y separado de los ácidos.  Evitar el contacto con ácidos minerales fuertes.  En condiciones de almacenamiento adecuado, se mantendrá estable hasta por 12 meses.	Lugares ventilados, frescos y secos.  Lejos de fuentes de calor e ignición.  Separado de materiales incompatibles.  Rotular los recipientes adecuadamente.



Aspectos	ALCALINIZANTE				
	Cal Hidratada – Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Sodio – NaOH	Bicarbonato de Sodio – NaHCO <sub>3</sub>	Carbonato de Sodio – Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio – CaCO <sub>3</sub>
<b>Dosificación</b>	<p>Cuando la materia prima proviene de la cal viva, requiere el proceso de apagado de la cal.</p> <p>Tramos cortos de tuberías como sea posible y asegurar velocidades de flujo de al menos 1,5 m/s.</p> <p>Requiere mantenimiento del sistema de preparación de cal.</p> <p>A gran escala puede ser necesario realizar cámaras de inspección en las tuberías.</p> <p>Debido a su baja solubilidad presenta tendencias de incrustaciones.</p> <p>Al tener baja solubilidad, puede contribuir al incremento de la turbiedad en el agua tratada.</p>	<p>Nunca usar agua caliente o agregar agua al hidróxido.</p> <p>El agua agregada al hidróxido de sodio puede causar ebullición incontrolada y salpicaduras violentas.</p> <p>Cuando se destapen contenedores con este material, no usar herramientas que produzcan chispas debido a la posibilidad de existencia de hidrógeno gaseoso.</p> <p>No forma sales insolubles y su estado líquido facilita su aplicación.</p> <p>Absorbe rápidamente dióxido de carbono y humedad del aire.</p>	<p>Fácil de manipular.</p> <p>Cuando se calienta en seco o en solución, cambia gradualmente a Carbonato de sodio.</p> <p>Es posible que se deba usar en combinación con pequeñas cantidades de Ca(OH)<sub>2</sub> o NaOH.</p> <p>Se recomienda su uso para pequeñas instalaciones o cuando la dosificación de la cal está generando problemas.</p>	<p>Se recomienda emplearse en bajas dosis junto con otro alcalinizante debido a los altos costos y la adición de cationes no deseados en el agua.</p>	<p>Proceso llevado a cabo en reactores con TRH &lt;15 minutos.</p> <p>Con el fin de permitir rápida disolución, se acidifica una parte del agua clorada en un reactor de disolución con ácido sulfúrico o CO<sub>2</sub>.</p> <p>No es posible una sobredosis del producto debido a que el pH raramente sobrepasa las 6.5 unidades por lo que comúnmente es necesaria una aplicación posterior de otro alcalinizante tanto para alcanzar un valor de pH más adecuado para el agua potable y producir agua que es químicamente estable dentro del SDA.</p>



Aspectos		ALCALINIZANTE					
		Cal Hidratada – Ca(OH) <sub>2</sub>		Hidróxido de Sodio – NaOH	Bicarbonato de Sodio – NaHCO <sub>3</sub>	Carbonato de Sodio – Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio – CaCO <sub>3</sub>
Salud ocupacional	 <p><b>Valoración NFPA 704 - National Fire Protection Association</b> (Escala 0:Mínimo; 1:ligero; 2: Moderado; 3: Serio; 4:Severo)</p>	<i>Si proviene de CaO</i>	<i>Si proviene de Cal apagada</i>	Salud ocupacional: 3 (Muy peligroso)	Salud ocupacional: 0 (sin riesgo)	Salud ocupacional: 2 (Peligroso)	Salud ocupacional: 1 (Poco peligroso)
		Salud ocupacional : 3 (Muy peligroso)	Salud ocupacional: 1 (Poco peligroso)				
		Inflamabilidad: 0 (No se inflama)	Inflamabilidad: 0 (No se inflama)	Inflamabilidad: 0 (No se inflama)	Inflamabilidad: 0 (No se inflama);	Inflamabilidad: 0 (No se inflama);	Inflamabilidad: 0 (No se inflama)
		Reactividad : 0 (Estable)	Reactividad: 0 (Estable)	Reactividad: 1 (Inestable en caso de calentamiento)	Reactividad: 0 (Estable)	Reactividad: 0 (Estable)	Reactividad: 0 (Estable)
Económicos	<b>Fácil adquisición en Colombia</b>	SI		SI	SI	SI – Sustancia controlada en Colombia	NO pero sí en México, Ecuador, Argentina, Brasil
	<b>Solubilidad (g producto/ 100ml agua) 20°C</b>	0.2		111	9.6	7.1-10	0.0014
	<b>% Contenido activo disponible</b>	<i>Si proviene de CaO</i>	<i>Si proviene de Cal apagada</i>	99 – 100%	98 – 100%	98 – 99%	95 – 99%
		Mín. 90%	75 – 84%				
<b>Costos de materia prima (COP\$/Kg Sin IVA)</b>	<i>Si proviene de CaO</i>	<i>Si proviene de Cal apagada</i>	1050 (Quimpac S.A. – Cali)	31.2 (Transmerquim de Colombia S.A. – Cali)	900 (0.45U\$) Es importado sin incluir su costo de transporte (Manufacturas Silíceas SAS – Bogotá)	80 (0.04U\$) Es un producto importado sin incluir el costo de transporte	
	336 (Procecal – Medellín) Precio incluido transporte a Cali.	475 (Procecal – Medellín) Precio incluido el transporte a Cali					

\*Cálculo presentado en el Anexo 1; \*\*Valor máximo recomendado sin efectos a la salud: 60 mg Ca<sup>+2</sup>/L (Resolución 2115 de 2007); 200 mg Na<sup>+1</sup>/L (WHO, 2011); Referencias: Khawaji & Wie, 1994; Berghult et al. 1999; Cotoruelo & Marqués, 1999; Manharawy & Hafez, 2002; Barrenechea, 2004; Withers, 2005; GQ, 2006; Lozano, 2006; Fritzmán et al. 2007; Kim et al. 2008; Torres et al. 2008; Casey, 2009; Vargas et al. 2009; Colindres, 2010; Ebbing & Gammon, 2010; Birnhack et al. 2011; Labiod & Ghizellaoui, 2012; Ashton Acton, 2013; Lehmann et al. 2013; Sallanko et al. 2013.

La dureza total, que influye en la capacidad del agua para generar corrosión o incrustación, depende principalmente de la adición de calcio (Varó Galván et al. 2004); en este caso, la cal hidratada y el carbonato de calcio son los principales aportantes del mismo recomendándose valores promedio de dureza calctica  $>40\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ . Los alcalinizantes que aportan cationes de sodio (hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de sodio), deben tener en cuenta no superar concentraciones de 200 mg/L, pues pueden generar rechazo por parte del usuario en términos de sabor (Landaverde & Velásquez, 2011; WHO, 2011).

Respecto a los demás factores técnicos, salud ocupacional y económica, el manejo de los alcalinizantes depende de varios aspectos. En la mayoría de los casos, para obtener cal hidratada es mejor utilizar como materia prima CaO ya que contiene mayor porcentaje de ingrediente activo que la cal apagada; dicha materia prima implica adicionalmente que exista el proceso de apagado, el cual requiere mayor tiempo de dedicación de los operadores y consumo de agua potable (Lozano, 2006; Procecal, 2009). En términos de salud ocupacional, el CaO es muy peligroso ya que al reaccionar con el agua libera calor, lo que puede encender materiales en contacto o cercanos como papel, tela, cartón, entre otros (Calidra, 2007).

Aunque la cal se destaca por su fácil adquisición y bajo costo en Colombia, es importante resaltar que debido a su baja solubilidad, la dosificación implica constante mantenimiento, cámaras de inspección, posibles incrementos en la turbiedad final e incrustaciones en trayectos largos donde el punto de preparación de la lechada es muy distante de su aplicación (Manharawy & Hafez, 2002; Barrenechea, 2004; Withers, 2005; Torres et al. 2008; Labiod & Ghizellaoui, 2012).

El hidróxido de sodio es de fácil manejo pues su alta solubilidad permite una buena mezcla, evitando incrustaciones o incrementos de turbiedad en el agua final; es de fácil adquisición a nivel nacional, contiene un alto porcentaje de ingrediente activo pero como materia prima es costoso (Torres et al. 2008; Sallanko et al. 2013; Minambiente, 2014). En términos de salud ocupacional, la NFPA 704 lo clasifica como muy peligroso debido a que es altamente corrosivo, causando fuertes quemaduras, lo que implica cuidados especiales en su almacenamiento como el requerimiento de materiales de polietileno de alta densidad, precauciones en líneas de conducción eléctrica por la posibilidad de generación de hidrógeno inflamable, entre otras (GQ, 2006; Corquiven, 2007; Kim et al. 2008; Vargas et al. 2009).

El bicarbonato de sodio es un producto fácil de manejar, siendo más soluble a temperaturas  $>28^\circ\text{C}$  en donde se comporta como carbonato de sodio; se encuentra disponible a nivel nacional con alto porcentaje de contenido activo y costos de materia prima bajos (Barrenechea, 2004; GQ, 2006; Ebbing & Gammon, 2010). Es un producto inofensivo pues en términos de salud ocupacional no presenta ningún riesgo para los humanos, incluso cuando están presentes en niveles elevados (Takasaki & Yamada, 2007); sin embargo, para la estabilización del pH puede ser necesario mezclarlo con cal hidratada o hidróxido de sodio, en el caso que se requieran generar  $\text{pH}>8$  unidades ya que es un producto que suavemente cambia el equilibrio del agua (Kim et al. 2008; Casey, 2009), por lo cual, su

aplicación se recomienda en plantas de pequeña escala o cuando la cal hidratada genere problemas (GQ, 2006; Casey, 2009).

El carbonato de sodio al igual que el bicarbonato de sodio, es un producto de fácil manejo que requiere ser utilizado con otro alcalinizante debido principalmente a su alto costo en el mercado y la adición de cationes no deseados en el agua (Manharawy & Hafez, 2002; Colindres, 2010); tiene un alto contenido de ingrediente activo, pero su adquisición presenta limitaciones pues además de ser importado, es una sustancia controlada nacionalmente (Di Bernardo & Sabogal, 2008; Birhnack et al. 2011). La NFPA 704, lo clasifica como peligroso, lo que implica la necesidad de materiales especializados para su manejo (Hilleboe, 2006; Kim et al. 2008).

El carbonato de calcio, siendo utilizado principalmente en países como México, Ecuador, Argentina y Brasil, demanda costos adicionales de importación (Corquiven, 2014); este producto presenta un alto contenido activo y la NFPA 704 lo clasifica como poco peligroso; sin embargo, al ser más insoluble que la cal hidratada, requiere acidificar previamente el agua con CO<sub>2</sub>, permanecer al menos 15 minutos en un reactor y adicionar otro alcalinizante para llegar a valores adecuados de la estabilización del pH (Birhnack et al. 2011; Lehmann et al. 2013).

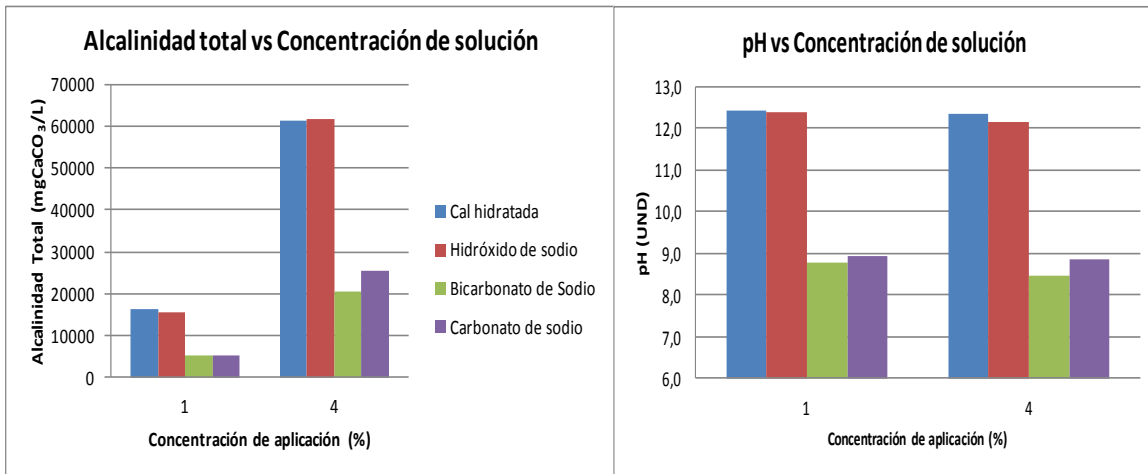
Todos los productos analizados tienen potencial de ser usados en el proceso de estabilización del pH y su selección depende de los diferentes factores mencionados, específicamente del agua cruda, del tipo de procesos de tratamiento empleados previamente, de la disponibilidad en el sitio, etc.; por esta razón, el carbonato de calcio no fue evaluado pues presenta limitaciones como la adición de CO<sub>2</sub> e importación del producto. Los alcalinizantes que se evaluaron en la siguiente etapa fueron cal hidratada, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de sodio mediante el previo calentamiento del bicarbonato de sodio.

### **6.3.2 Evaluación de diferentes alcalinizantes**

#### ***Concentración de solución de los alcalinizantes***

La Figura 7 presenta los resultados de alcalinidad total y pH obtenidos en la preparación de la concentración de solución de los alcalinizantes evaluados.

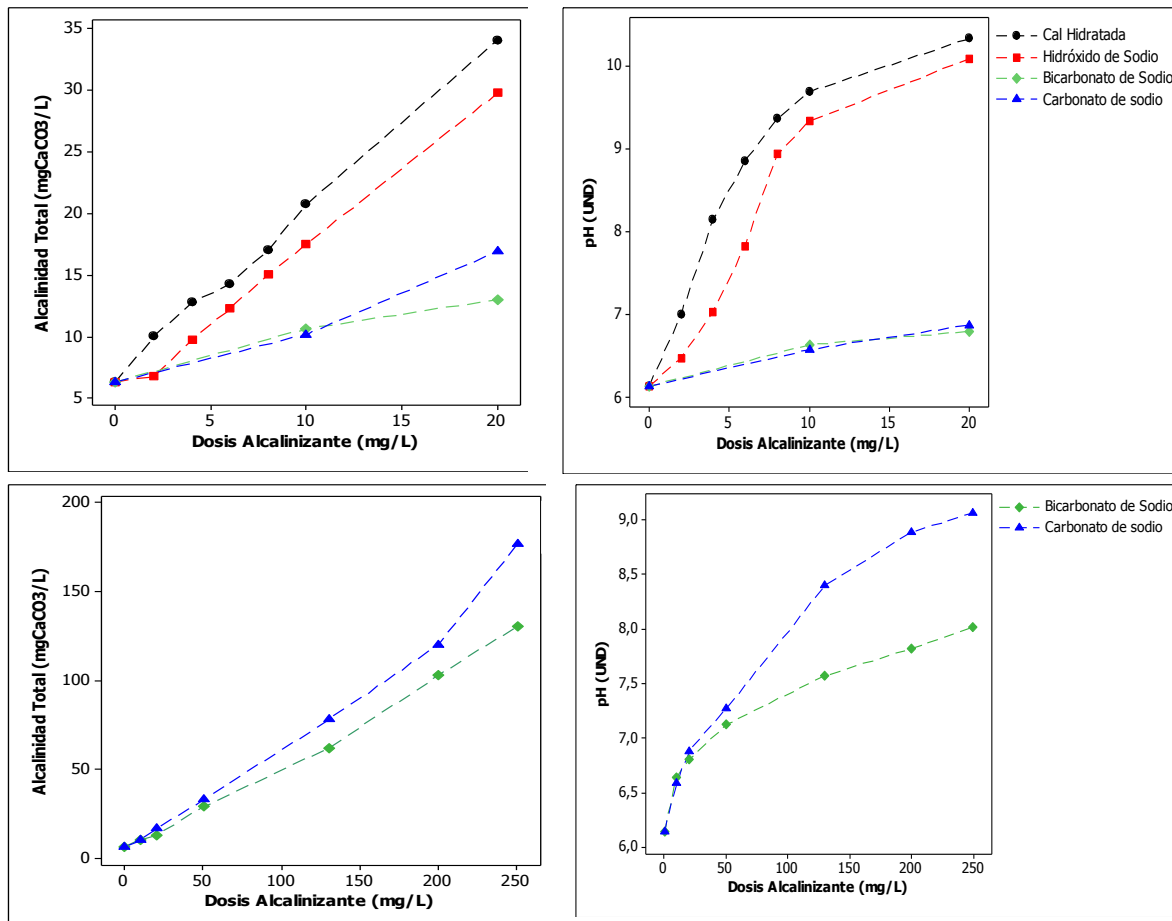
De acuerdo con la Figura 7, se puede observar que las bases fuertes como cal hidratada e hidróxido de sodio, incrementan en mayor proporción la alcalinidad total y el pH independiente de la concentración de aplicación, comparado con las sales como bicarbonato de sodio y carbonato de sodio; este comportamiento se presenta debido a que las bases fuertes incrementan el contenido de OH<sup>-</sup> disponibles en el agua, mientras que los demás alcalinizantes, por ser sales, mantienen un pH máximo de 9 unidades (Lahav et al. 2009; Birhnack et al. 2011) lo que ratifica la importancia de características como la química, aporte de alcalinidad total debido a los aniones de cada alcalinizantes y su capacidad buffer.



**Figura 7.** Comportamiento de la alcalinidad total y el pH a diferentes concentraciones de solución de alcalinizantes evaluados

### *Dosis de alcalinizantes y aplicación de índices*

La Figura 8 muestra el comportamiento de los alcalinizantes respecto a la alcalinidad total y pH (los datos se presentan en el Anexo 2).



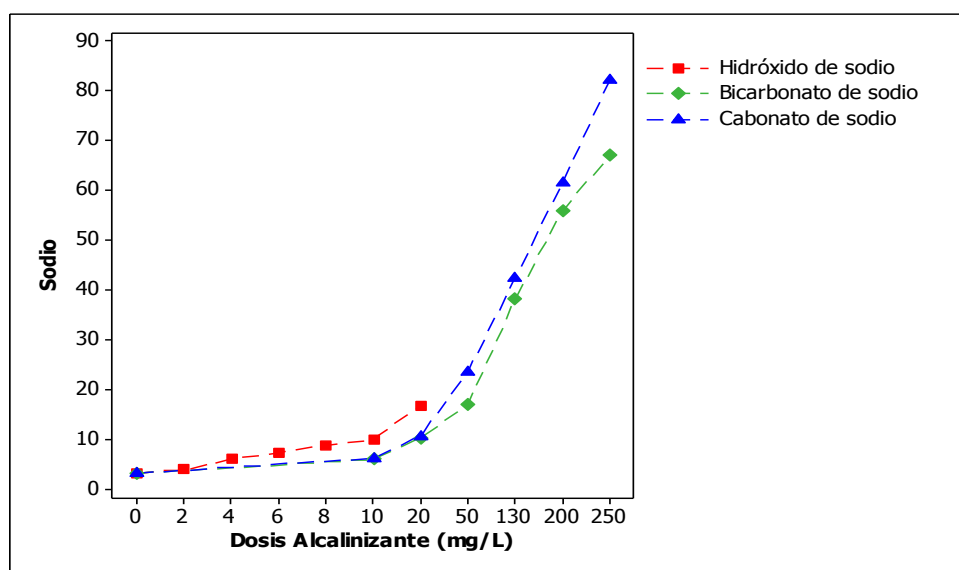
**Figura 8.** Efecto de diferentes alcalinizantes sobre alcalinidad total y pH para las dosis evaluadas

De acuerdo con las Figura 8, se observa que las bases fuertes incrementan los valores de alcalinidad total y pH con dosis bajas, mientras que las sales requieren dosis mayores lo que concuerda con lo reportado por De Sousa et al. (2010); sin embargo, las bases fuertes no aportan la alcalinidad mínima requerida para mantener la capacidad buffer en el SDA (aprox. 40mgCaCO<sub>3</sub>/L) debido a las reacciones químicas de los alcalinizantes (Birnhack et al. 2011).

En términos del pH final, el único alcalinizante que no logró alcanzar el pH mínimo (pHs) para generar la tendencia a precipitar la película de carbonato de calcio (encontrado en el objetivo 2 mediante el cálculo del ISI y PPCC, pHs = 8,7 – 9.0 unidades), fue el bicarbonato de sodio ya que el pH máximo alcanzado fue de 8 unidades. El carbonato de sodio logra los valores tanto de alcalinidad total como pH mínimos requeridos, pero es necesario utilizar dosis superiores a 130 mg/L la cual podría conllevar a problemas en su dosificación y almacenamiento, de acuerdo al volumen de agua a estabilizar (Dongchan et al. 2008).

Al utilizar productos que contienen Sodio (Na<sup>+</sup>) como el hidróxido de sodio, el bicarbonato de sodio y el carbonato de sodio, es recomendable controlar su concentración en el agua, aunque la Resolución 2115/2007 no lo reglamente; al respecto, la WHO (2011) sugiere que el sodio no supere una concentración de 200 mg/L ya que puede generar rechazo por parte de los usuarios por generar problemas de sabor en el agua.

La Figura 9 muestra las concentraciones obtenidas en los ensayos de alcalinizantes que contienen sodio en donde se observa que ninguna de las dosis evaluadas para estos alcalinizantes excedió el valor recomendado de 200 mg/L, lo que puede indicar que las dosis evaluadas podrían ser aplicadas en el SDA sin causar efectos secundarios por la adición del sodio.



**Figura 9.** Concentraciones de Sodio obtenidas para los alcalinizantes hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de sodio.

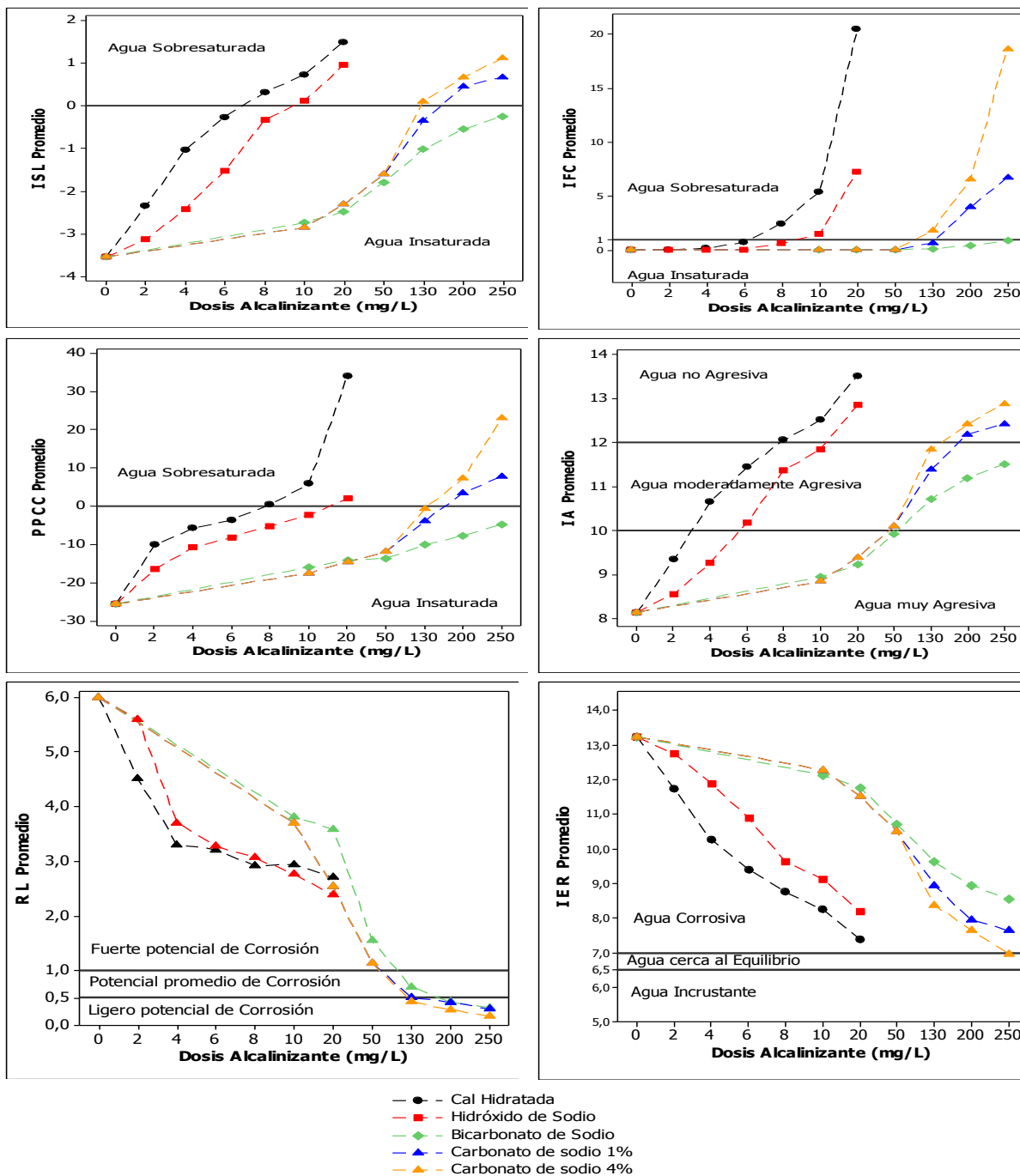
Mediante el diseño experimental empleado y las pruebas de comparación múltiples, se encontró que los índices de estabilización del pH (ISL, IFC, PPCC, IER, IA y RL) presentan un efecto de interacción entre los tres factores evaluados (% concentración de solución, alcalinizante y dosis), lo cual indica que se deben evaluar de manera conjunta y no individual. Las covariables pH, Dureza cálcica y alcalinidad total, presentan un efecto sobre los índices de estabilización siendo el pH el más influyente. Para la cal hidratada y el hidróxido de sodio, los índices de estabilización del pH no presentaron diferencias significativas para las concentraciones de aplicación (1 y 4%,  $p > 0.05$ ). Para el bicarbonato y carbonato de sodio, no existen diferencias significativas para la concentración de aplicación al 1%; pero sí para el 4%, presentando mejores resultados con el carbonato de sodio al utilizar dosis superiores a 130 mg/L (Ver Anexo 2).

La Figura 10 presenta el comportamiento para los índices de estabilización y los alcalinizantes evaluados.

De acuerdo con la Figura 10, se observa que todos los alcalinizantes presentan condiciones que favorecen la tendencia de precipitar carbonato de calcio en el SDA según los índices ISL, IFC y PPCC, ya que el pH obtenido supera el pHs del agua (8.7 – 9.0 unidades), a excepción del bicarbonato de sodio ya que se mantuvo entre 7 – 8.3 unidades (Letterman, 2001; Ebbing & Gammon, 2010; De Sousa et al. 2010).

Con relación a los índices que tienen aplicación para tipos específicos de materiales de la tubería del SDA, como el IA para las tuberías de AC (31.9% del SDA es en AC y presentan el mayor número de daños) se observa que todos los alcalinizantes, con excepción del bicarbonato de sodio, permiten obtener aguas con tendencia no agresivas debido principalmente a que superan el pHs.

Para el índice RL aplicado para tuberías metálicas (representa el 11.5% del SDA de Cali), únicamente el bicarbonato y carbonato de sodio permiten resultados de ligero a pequeño potencial de corrosión, con dosis superiores a 200 mg/L debido a que aportan directamente el ion bicarbonato superando la relación de cloruros y sulfatos de la ecuación para éste índice (Agatemor & Okolo, 2008; Trujillo et al. 2008); para el IER aplicado para tuberías de acero (representan el 1.2% del SDA de Cali), se observa que ningún alcalinizante lograría generar condiciones de incrustación, ya que el carbonato de sodio presenta condiciones cercanas al equilibrio con dosis de 250 mg/L, lo que excedería la Resolución 2115/2007 en términos de alcalinidad total y pH.



**Figura 10.** Índices de estabilización del pH con diferentes alcalinizantes

La Tabla 11 muestra las recomendaciones para las condiciones de operación en términos de concentración de solución, dosis, alcalinidad total y pH de acuerdo con los resultados óptimos de índices de estabilización del pH ISL, IFC, PPCC e IA, para los alcalinizantes evaluados con excepción del bicarbonato de sodio, pues fue el único que no permitió obtener condiciones adecuadas para la estabilización del pH.



**Tabla 11.** Condiciones de operación y resultados para la estabilización del pH con diferentes alcalinizantes.

Parámetro	Alcalinizantes			Normatividad	
	Cal hidratada	Hidróxido de sodio	Carbonato de sodio	Nacional (Res. 2115/07)	Internacional
Concentración de solución (%)		1 o 4	4 con dosis > 130 mg/L	-	-
Dosis (mg/L)	6 – 8	8 – 10	130 – 200	-	-
pH (unidades)	8.8 – 9.3	9.1 – 9.4	8.6 – 9.0	6.5 – 9.0	6.0 – 9.5* 6.5 – 9.5** 6.5 – 10.0***
Alcalinidad Total (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	14 – 16	16 – 19	85 – 125	200	-

\* Brasil, PORTARIA N° 518/2004.

\*\*Unión Europea, Directiva 98/83/CE; España, Decreto Real 140/2003; Alemania, TrinkwV 2001.

\*\*\*Reino Unido, No. 3911/2001 (W.323).

La Tabla 11 junto con los resultados del análisis estadístico, evidenciaron que no existieron diferencias estadísticas significativas entre las concentraciones de aplicación, por lo que se sugiere aplicar para todos los alcalinizantes a una concentración de aplicación del 4% pues se requeriría menos agua tratada para su preparación y menos volumen de almacenamiento (López, 2000).

En términos de dosis de aplicación, la cal hidratada sería la que menor requerimiento de materia prima necesitaría para obtener óptimos resultados en el proceso de estabilización del pH, seguido por el hidróxido de sodio y por último el carbonato de sodio; sin embargo, se debe tener en cuenta las limitaciones de cada producto, pues en general la cal hidratada presenta problemas por la baja solubilidad con el agua, el hidróxido de sodio requiere mayor complejidad de almacenamiento y el carbonato de sodio es una sustancia controlada al interior del país.

Como principal variable en el proceso de la estabilización, el pH debe controlarse con el fin de reducir al mínimo la corrosión del SDA, evitando posible contaminación del agua de consumo por disolución de metales y efectos adversos de aspecto y sabor (Tam & Elefsiniotis, 2009; Wilczak et al. 2010; WHO, 2011). Sin embargo, la norma Colombiana no permitiría obtener condiciones adecuadas para promover la película de carbonato de calcio en el SDA de Cali, debido principalmente a la limitación del pH, ya que para obtener buenos resultados, éste debe exceder al menos 0.2 unidades respecto al pHs el cual se encuentra entre 8.7 – 9.0 unidades estando en el límite máximo de la Resolución 2115/2007; sin embargo, otros países como Brasil, la Unión Europea y el Reino Unido, permiten valores máximos de pH > 9.0 unidades que permiten disminuir el efecto de corrosión en los SDA (Hamdy et al. 2011; Rout et al. 2014).

El valor de la alcalinidad al final del proceso de estabilización del agua tratada del río Cauca debe estar en un rango mínimo entre 27.3–36.7 mgCaCO<sub>3</sub>/L (valor obtenido mediante el cálculo de la PPCC con los datos históricos), siendo acorde con lo recomendado en la literatura para generar la precipitación de la película de carbonato de calcio en el SDA sugiriendo valores entre 40 – 80 mgCaCO<sub>3</sub>/L (Khawaji & Wie, 1994; Berghult et al. 1999; Imran et al. 2005). Las bases fuertes como Cal hidratada e hidróxido

de sodio, incrementan rápidamente el pH pero no logran resultados adecuados de alcalinidad que brinden mayor capacidad para neutralizar ácidos y evitar la disminución del pH en el SDA; mientras que el carbonato de sodio alcanza dichos valores de alcalinidad total, requiere mayores dosis debido principalmente al aporte de alcalinidad por mg/L de producto adicionado ( $0.94 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ) y el bicarbonato de sodio no permite alcanzar el pHs del agua del río Cauca.

Por lo anterior, es necesario para futuros ensayos, evaluar las combinaciones de los alcalinizantes que proporcionen los valores adecuados de alcalinidad total y pH, así como tener en cuenta la evaluación de adicionar dióxido de carbono, el cual incrementa la alcalinidad mediante la formación del ácido carbónico que posteriormente incrementa los iones carbonato y disminuye los pH que superan la normatividad Nacional (Withers, 2005; Hart, 2008; Birnack et al. 2011).

## 7. CONCLUSIONES

La adecuada utilización de los índices de estabilización como método indirecto de monitoreo desde las plantas de tratamiento, permite identificar sus características agresivas, corrosivas o incrustantes siendo una alternativa económica y viable que puede ser utilizada desde las plantas de tratamiento.

Los índices y métodos de mayor aplicación se clasifican en 2 tipos (cualitativos y cuantitativos). Los cualitativos se agruparon en: 1) Tendencia a precipitación de carbonato de calcio (Índice Saturación de Langelier-*ISL*, Índice de Fuerza de Conducción de Mc Cauley-*IFC*, Potencial de Precipitación de Carbonato de Calcio-*PPCC*) siendo útiles inicialmente para proporcionar las condiciones de sobresaturación; 2) Tipo de tubería (Índice de Agresividad-*IA*, Índice Relación de Larson-*RL*, Índice de Estabilidad de Ryznar-*IER*) aplicados en materiales de asbesto cemento – AC, hierro y acero; 3) Aplicación directa en el SDA (Índice Relación de Larson Modificado – *RLM*, Índice de Corrosión de Riddick – *ICR*) que consideran variables como tiempo de retención hidráulico,  $\text{CO}_2$ , sodio, nitratos, OD y silicatos; los modelos cuantitativos fueron los Diagramas de Caldwell-Lawrence modificados y Método de Mojmir Mach, que utilizan gráficos que determinan el equilibrio de saturación del  $\text{CaCO}_3$  y la agresividad del agua, requiriendo de software especializado para su aplicación.

Se encontró que la aplicación de un solo índice no permite representar el comportamiento global del agua en un SDA, siendo recomendable utilizar al menos un índice que proporcione información sobre la tendencia de precipitación de  $\text{CaCO}_3$  junto con el cálculo de la *PPCC* y otro que represente las necesidades del SDA de acuerdo con el tipo de material de las tuberías. De acuerdo con lo anterior, las características del SDA de la ciudad de Santiago de Cali y la información disponible, es recomendable utilizar varios índices para el control del proceso de estabilización del pH del agua tratada del río Cauca como *ISL*, *IFC*, *PPCC*, *IA*, *RL* y *IER*.

Al proporcionar condiciones adecuadas de pH y alcalinidad total en el proceso de estabilización del agua tratada del río Cauca, se pueden aplicar los índices *RL* e *IER* que representan las tuberías de hierro (11.5% del SDA) y acero (1.2% del SDA), respectivamente.

Dentro de las principales opciones de alcalinizante para el proceso de estabilización del pH se identificaron la cal hidratada, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio, carbonato de sodio y carbonato de calcio, los cuales deben tener en cuenta aspectos técnicos, salud ocupacional y económicos que permitan seleccionar el producto más adecuado a las condiciones locales.

La cal hidratada y el hidróxido de sodio con dosis de aplicación entre 6 – 8mg/L y 8 – 10mg/L, respectivamente, generan aguas con tendencia a precipitar la película de carbonato de calcio y condiciones de agua no agresiva para las tuberías de AC en el SDA de la ciudad de Santiago de Cali, de acuerdo a los índices *ISL*, *IFC*, *PPCC* e *IA*. Las principales variables operacionales del proceso de estabilización para el agua tratada del río Cauca como pH deben permanecer entre 8.8 – 9.4 unidades; sin embargo, dichos alcalinizantes no

logran obtener valores de alcalinidad total adecuados que brinden mayor capacidad para neutralizar ácidos y evitar la disminución del pH en el SDA.

Aunque el carbonato de sodio y bicarbonato de sodio no exceden la concentración de sodio máxima permitido, este último no se recomienda para el agua tratada del río Cauca pues al mantenerse en  $\text{pH} < 8.0$  unidades, no permite obtener resultados adecuados para la estabilización del pH. Para el uso del carbonato de sodio, se recomienda utilizar dosis superiores a  $130\text{mg/L}$ , las cuales generan resultados adecuados en términos de los índices ISL, IFC, PPCC, IA e RL, manteniendo las variables de pH entre  $8.6 - 9.0$  unidades y alcalinidad total entre  $85-125\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ .

Estadísticamente, los índices de estabilización ISL, IFC, PPCC, IER, IA y RL no presentan diferencias significativas con la aplicación de concentración de solución al 1% o 4% para la cal hidratada y el hidróxido de sodio; mientras que para el bicarbonato de sodio y carbonato de sodio, no existen diferencias significativas para la concentración de solución al 1%, pero sí para el 4%, presentando mejores resultados utilizando carbonato de sodio con dosis superiores a  $130\text{mg/L}$ .

De acuerdo con los resultados de esta investigación, es recomendable utilizar varios índices para realizar un mejor control del proceso de estabilización, los cuales incluyan aspectos relacionados tanto con el ajuste del pH como con el tipo de material de la tubería; adicionalmente, se deben mejorar las condiciones de estabilización del pH manteniéndolo en concentraciones iguales o superiores al pH de saturación ( $\text{pHs: } 8.7 - 9.0$  unidades) y a la alcalinidad de equilibrio ( $\text{Alk}_{\text{eq}}: 27.3 - 36.7\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ), lo que indica la necesidad de revisar la normatividad colombiana vigente sobre agua potable ya que, aunque el agua del río Cauca tratada en las plantas de tratamiento de Puerto Mallarino y Río Cauca cumple con la misma en términos de pH y alcalinidad total, los índices aplicados clasifican esta agua como insaturada con tendencia a la corrosión en el sistema de distribución.

## 8. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una revisión a la Resolución Colombiana 2115/2007 en términos del pH, teniendo en cuenta que para disminuir la corrosión en aguas con baja alcalinidad como el río Cauca, se requieren valores máximos de pH superiores a 9.0 unidades de acuerdo con el pH de saturación.

Se recomienda evaluar la posibilidad de continuar sustituyendo las tuberías de AC y hierro, que son materiales que favorecen la lixiviación de metales y causan el mayor número de daños por el PVC, el cual es un material altamente resistente a agentes químicos y propicio para la distribución del agua potable.

Con el fin de complementar la evaluación del proceso de estabilización del pH directamente en el SDA, se sugiere emplear los índices RLM y ICR; además del método de Mojmir-Mach, si se cuenta con software especializado.

Para la selección adecuada de otro alcalinizante diferente a la cal hidratada, se recomienda realizar un completo análisis económico que tenga en cuenta las ventajas y limitaciones de cada alcalinizante valorizándolos cuantitativamente para su selección y aplicación en el proceso de estabilización del pH.

Es recomendable continuar evaluando otras alternativas que proporcionen valores adecuados de alcalinidad total y pH, como incrementar la alcalinidad desde la fuente de abastecimiento, cambiar el tipo de coagulante o aplicar coagulación mejorada, evaluar diversos materiales filtrantes que incluyan carbonato de calcio, mezcla de alcalinizantes o bases fuertes con adición de dióxido de carbono.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agatemor, C.; Okolo, P. O. (2008). Studies of corrosion tendency of drinking water in the distribution system at the University of Benin. *Journal The Environmentalist*, 28(4): 379-384.

Ahmadi, M.; Mohammadi, M. J.; Ahmadi-Angaly, K.; Babaei, A. A.; Vosoughi-Niri, M.; Alavi, N.; Saki, H. (2014). Failures analysis of water distribution network during 2006-2008 in Ahvaz, Iran. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 1(2): 129-137.

Anderson, T.W. & Darling, D.A. (1954). A Test of Goodness-of-Fit. *Journal of the American Statistical Association* 49: 765–769.

APHA-AWWA-WEF (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters. 21st Edition.

Arjona-Rodríguez, S.; Torres-Lozada, P.; Cruz-Vélez, C.H.; Loaiza-Cadavid, D.L.; Escobar-Rivera, J.E. (2012). Efecto del punto de precloración sobre la formación de Trihalometanos en procesos convencionales de potabilización de agua. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, 11(20): 57-66.

Ashton Acton, Q. (2013). Alkalies – Advance in Research and Application. *Scholarly Editions*. 430p.

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): 93-104.

Barid, C (2004). Química ambiental. Segunda Edición. Editorial Reverte SA. Barcelona, 622 p.

Barrenechea, A. (2004) Capítulo 1. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. EN: De Vargas, L. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente–CEPIS, Organización Panamericana de la Salud–OPS. Lima, Perú.*

Bartlett, M. S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Statistical Society, Series A*, 160: 268–282.

Benefield, L.D.; Morgan, J.M. (2002). Chapter 10: Chemical precipitation. In: Water quality and treatment. A Handbook of Community Water Supplies. AWWA, Editor Raymond Letterman, Quinta Edición. Ed. Mc Graw Hill, Spain.

Berghult, B.; Hedberg, T.; Elfström Broo, A. (1999). Drinking water distribution: corrosion control in Swedish municipalities. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 48: 44-52.

Birnhack, L.; Voutchkov, N.; Lahav, O. (2011). Fundamental chemistry and engineering aspects of post-treatment processes for desalinated water—A review. *Desalination*, 273(1): 6-22.

Bordoloi, S.; Nath, M.; Dutta, R.K. (2013). pH-conditioning for simultaneous removal of arsenic and iron ions from groundwater. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(5): 405-414.

Branan, C.R. (2011). Rules of Thumb for Chemical Engineers. 4th Edition. *Elsevier Inc.* 496 p.

Bueno-Zabala, K.A.; Torres-Lozada, P.; Delgado-Cabrera, L.G. (2014). Identificación de peligros químicos en cuencas de abastecimiento de agua como instrumento para la evaluación del riesgo. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, Artículo aceptado, pendiente publicación.

Calidra (2007). Hoja de seguridad hidroxido de calico. Grupo calidra. Accedido en Febrero 18 de 2014. Disponible en <http://calidra.com/wp-content/uploads/pdf/MSDSCalHidratadaVer07.pdf>

Casey, T. J. (2009). Water stabilisation and corrosion control. Aquavarra Research R&D Publications. Paper 2. 12 p.

CNA – Comisión Nacional del Agua (1994). *Protección catódica y recubrimientos anticorrosivos. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Libro V, 3.5.1. México.

Colindres, A.L. (2010). Evaluación del sistema de potabilización en la Escuela Agrícola Panamericana. Ingeniería en Desarrollo Socio-Económico y Ambiente. Honduras: Zamorano.

Cotoruelo, L.M; Marqués, Ma. D (1999) *Tratamiento de aguas. Los metales pesados en las aguas, acciones químicas*. Publicación, Dpto. de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga.

De Moel, P. J.; Van der Helm, A. W. C.; Van Rijn, M.; Van Dijk, J. C.; Van der Meer, W. G. J. (2013). Assessment of calculation methods for calcium carbonate saturation in drinking water for DIN 38404-10 compliance. *Drinking Water Engineering & Science Discussions*, 6(2): 115-124.

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. *Bol Mal Salud Amb*, 48(1): 17-26.



De Sousa, C.; Correia, A.; Colmenares, M. C. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Bol Mal Salud Amb*, 50(2): 187-196.

Delion, N.; Mauguin, G.; Corsin, P. (2004). Importance and impact of post treatments on design and operation of SWRO plants, *Desalination*: 165: 323-334.

Di Bernardo, L.; Sabogal Paz, L. (2008). Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água. São Carlos: Editora LDIBE LTDA. Vol I. 878 p.

Dongchan, L.; Yoonjin, L.; Sangho, N. (2008). Corrosion Control by using  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{CO}_2$  in Water Distribution Systems. *Asian Journal of Chemistry*, 20(7): 5745-5759.

Droste, R. L. (1997). Theory and practice of water and wastewater treatment. John Willey & Sons, Inc. 468-47 p.

Ebbing, D.D.; Gammon, S.D. (2010). *Química general*, Novena Edición: Cengage Learning Editores, S.A. 1025 p.

Edzwald, J (2011). Water Quality & Treatment. A Handbook on Drinking Water. American Water Works Association. Sixth Edition. McGraw Hill.

Fritzmann C.; Löwenberg J.; Wintgens T.; Melin T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*: 216: 1 – 76.

Furtado, P. S.; Poersch, L. H.; Wasielesky, W. (2011). Effect of calciumhydroxide, carbonate and sodiumbicarbonate on waterquality and zootechnicalperformance of shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in bio-flocstechnology (BFT) systems. *Aquaculture*, 321(1-2): 130–135.

Godínez, L.A; Meas, Y.; Ortega-Borges, R.; Corona, A. (2003). Los inhibidores de corrosión. *Revista de Metalurgia*, 39(2): 140-158.

González, C. M. (1997). Caracterización de las aguas de la cuenca del río Lerma a través de metodologías de especiación metálica y la construcción de gráficos Tillmans, de Langelier y Mojmir Mach. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. pp. 167-197.

González, S.; López-Roldan, R.; Cortina, J. L. (2013). Presence of metals in drinking water distribution networks due to pipe material leaching: a review. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 95(6): 870-889.

GQ – Gouvernement du Québec (2006). *Guide de conception des installations de production d'eau potable*. Volume 1 y 2. modifiés le 4 décembre 2006, (en línea). <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/index.htm>. Acceso: Noviembre 10 de 2013.

Gray, N.F (2008). *Drinking Water Quality: Problems and Solutions* 2o ed. United States: Cambridge University Press. 520 p.

Hamdy, A.S.; Doench, I.; Möhwald, H. (2011). Smart self-healing anti-corrosion vanadia coating for magnesium alloys. *Progress in Organic Coatings*, 72(3): 387-393.

Hamrouni, B.; Dhahbi, M. (2003). Calco-carbonic equilibrium calculation. *Desalination*, 152(1-3):167-174.

Hart, V. (2008). Alkalinity Addition Utilizing Carbon Dioxide & Lime: Inexpensive Solution to a Historically Expensive Problem. *Journal Florida water resources*, 7pp. Disponible en: [http://www.techstreet.com/products/1699767/product\\_items/4552479](http://www.techstreet.com/products/1699767/product_items/4552479). [Accedido Mayo 01 de 2014].

Health Canada (2009). Guidance on Controlling Corrosion in Drinking Water Distribution Systems. Water, Air and Climate Change Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, Ottawa, Ontario. (Catalogue No. H128-1/09-595E).

Heller, L; De Pádua, V. L. (2006). Abastecimiento de Água para consumo humano. Conselho Editorial Executivo. Belo – Horizonte. Brasil.

Hilleboe, H. (2000). Manual de tratamiento de aguas. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. Edit. Limusa S.A. 208 p.

Houben, G. (2003). Iron oxide incrustations in wells - Part 1: Genesis, mineralogy and geochemistry. *Applied Geochemistry*. 18(6): 927–939.

Houben, G. J. & Weihe, U. (2009). Spatial distribution of incrustations around a water well after 38 years of use. *Ground Water*, 48(1): 53–58.

Hu, Y. & Hubble, D. W. (2007). Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(5): 608-621.

Imran, S.A.; Dietz, J.D.; Mutoti, G.; Taylor, J.S.; Randall, A.A. (2005). Modified Larsons Ratio incorporating temperature, water age, and electroneutrality effects on red water release. *J. Environm. Eng.* 131(11):1514-1520.

Jiang, B.; Shi, X.; Gao, J.; Zhao, H. (2012). Study of the Prior Repair of an Urban Drinking Water Distribution System. *ICPTT*:1210-1218.

Jiménez, B. & Rose J. (2009). Urban water security: managing risks. Vol. 5: Taylor & Francis.

Khan, S.; Shahnaz, M.; Jehan, N.; Rehman, S.; Shah, M. T.; Din, I. (2012). Drinking water quality and human health risk in Charsadda district, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*. Available online 3 March 2012.

Khawaji A. & Wie J. (1994). Potabilization of desalinated water at Madinat Yanbu Al-Sinaiyah. *Desalination*, 98: 135 – 146.

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): 531–539.

Labiod, K; Ghizellaoui, S. (2012) .Contribution to the inhibitors methods study of the scaling: Chemical, electrochemical processes in the presence of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , *Energy Procedia*: (18): 1541-1556.

Lahav, O.; Salomons, E.; Ostfeld, A. (2009) Chemical stability of inline blends of desalinated surface and groundwaters. The need for higher alkalinity values in desalinated water. *Desalination* (239): 334-345.

Landaverde E.; Velásquez G. (2011). Investigación de la demanda comercial y calidad fisicoquímica del bicarbonato de sodio, dispensado en las farmacias del área metropolitana de San Salvador. Tesis de grado. Universidad de El Salvador. Facultad de química y farmacia. pp. 200.

Lehmann O.; Birnhack L.; Lahav O. (2013). Design aspects of calcite-dissolution reactors applied for post treatment of desalinated water. *Desalination*, 314: 1-9.

Letterman R. (2001). *Water Quality and Treatment*. 5th edition. Ed. McGraw-Hill, INC., New York.

Loewenthal R. E.; Morrison I.; Wentzel M. C. (2004). Control of Corrosion and Aggression in Drinking Water Systems. *Water Science and Technology*. 49: 9-18.

López Cualla, R.A. (2000). Diseño de acueductos y alcantarillados 2.a ed., Alfaomega. 388p.

Lozano, P. (2006). Optimización del proceso de apagado de cal y estudio del acondicionamiento del pH con solución saturada de cal para la planta de potabilización puerto Mallarino. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Sanitaria. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería.

Manharawy, S.; Hafez, A. (2002). Study of seawater alkalization as a promising RO pretreatment method. *Desalination*: (153): 109-120.

McNeill, L.S.; Edwards, M. (2001). Review of iron pipe corrosion in drinking water distribution systems. *J. AWWA*, 93(7): 88-100.

Melidis, P.; Sanozidou, M.; Mandusa, A.; Ouzounis, K. (2007). Corrosion control by using indirect methods. *Journal Desalination*, 213(1): 152-158.

Minambiente (2003). Guía 17 Hidróxido de sodio. En línea [Accedido en Julio 27 de 2013] <http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia17.pdf>

Minambiente (2014). Hidróxido de Sodio. Documentos minambiente. Accedido el 39 de Enero de 2014. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia17.pdf>  
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*, (16): 137-148.

Mora V.; Cedeño J. (2006). Valuación de la Corrosión e Incrustaciones en Instalaciones Hidráulicas de una Planta de Potabilización en el Estado Bolívar, Venezuela. *Bol. Mal. Salud Amb.* 46: 67-78.

Moreno Capacho, J.A. & Delgado Aguilar, C.A. (2012). Evaluación del proceso de coagulación en la planta de tratamiento Bosconia, utilizando coagulantes inorgánicos y polímeros orgánicos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.

MPS – Ministerio De Protección Social; MAVDT – Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115 de 2007. República de Colombia.

Muñoz, N.; Sánchez, L. D.; Delgado, L. (2007). Caracterización microbiológica y fisicoquímica de la red baja de la ciudad de Cali. *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio* (p. 578). Universidad del Valle.

NALCO – Nalco Chemical Company (1988). The Nalco Water Handbook. McGraw Hill.  
OPS/CEPIS (2002). Capítulo 8 Tratamiento de Agua. En: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento. <http://www.ingenieriasanitaria.com/pdf/cap8.pdf>. Accedido en Febrero 12 de 2014.

PDA – Plan Departamental del Agua (2008). Valle del Cauca, Municipio: Santiago de Cali. Informe de Diagnostico en abastecimiento de agua y saneamiento básico en el Área Urbana.

Perea-Torres, L.M.; Torres-Lozada, P.; Cruz-Vélez, C.H.; Escobar-Rivera, J.C. (2013). Influencia de la configuración del medio filtrante sobre el proceso de filtración a tasa constante del agua clarificada del río Cauca. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, (38): 38-44.

Pérez, A. (2013). Propuesta metodológica para la formulación de los Planes de Seguridad del Agua como estrategia de Gestión del Riesgo en sistemas de abastecimiento de agua potable. Tesis de Doctorado. Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Cali – Colombia.

Pérez-Vidal A.; Amézquita-Marroquín C.; Torres-Lozada P. (2012). Identificación y priorización de peligros como herramienta de la gestión del riesgo en sistemas de distribución de agua potable. *Ing. Univ. Bogotá*, 16(2): 449-469.

Pérez-Vidal, A.; Torres-Lozada, P.; Escobar-Rivera, J. (2014). Hazard identification in watersheds based on water safety plan approach: case study of Cali-Colombia. *Environmental Engineering and Management Journal*. In press.

Procecal (2009). Ficha técnica Cal viva e hidratada industrial tipo N. Accedido en 29 enero 2014. Disponible en <http://www.procecal.com/home.html>.

Rahman, M.S. & Gagnon, G.A. (2014). Bench-scale evaluation of drinking water treatment parameters on iron particles and water quality. *Water research*, 48: 137-147.

RAS – Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000). Resolución 1096 de 2000, por la cual se adopta el Reglamento. Ministerio de Desarrollo Económico, Colombia.

Rendón W.; Rodrigo, A.; Balmes, L. (2013). Póster “Sistema para ajuste de pH en precal y poscal en las plantas de tratamiento de la empresa aguas y aguas Pereira” [En Línea, Accedido en Junio del 2013]. Disponible en [https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDIQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.aguasyaguas.com.co%2Fsitio%2Findex.php%3Foption%3Dcom\\_phocadownload%26view%3Dcategory%26download%3D60%3A..&ei=ZIPMUafdF6L50gHL2oGQBw&usg=AFQjCNF7tVUOcfZoqspo90iLN2IwFMAPwQ&sig2=CZhzOholuG8cM00q3SjkdA&bvm=bv.48572450,d.dmQ&cad=rja](https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDIQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.aguasyaguas.com.co%2Fsitio%2Findex.php%3Foption%3Dcom_phocadownload%26view%3Dcategory%26download%3D60%3A..&ei=ZIPMUafdF6L50gHL2oGQBw&usg=AFQjCNF7tVUOcfZoqspo90iLN2IwFMAPwQ&sig2=CZhzOholuG8cM00q3SjkdA&bvm=bv.48572450,d.dmQ&cad=rja)

Reyes, A.; Letelier, M.V.; De la Iglesia, R.; González, B.; Lagos, G. (2008). Microbiologically induced corrosion of copper pipes in low-pH water. *International biodeterioration & biodegradation*, 61(2): 135–141.

Rompré, A. (1996). Impacts of corrosión control strategies on biofilm growth in drinking water distribution system. In *Proc. AWWA Water Quality Technology Conference*. Boston, MA.

Rout, P. K.; Ghosh, M. M.; Ghosh, K. S. (2014). Effect of solution pH on electrochemical and stress corrosion cracking behaviour of a 7150 Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*. Accepted Manuscript.

Sadiq, R.; Rajani, B.; Kleiner, Y. (2004). Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains. *Reliability Engineering & System Safety*, 86(1): 1–10.

Sallanko, J.; Hietala, J.; Lindström, R.; Kytövaara A.; Väisänen T. (2013). More efficient alkalisation with ground limestone in groundwater treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 62 (3): 183 – 188.

Salvato, J. A.; Nemerow, N. L.; Agardy, F. J. (2003). *Environmental Engineering*. 5.a ed. John Wiley & Sons, Inc. 1544 p.

Sánchez, G.S.; Pujol, R.O.; Coda, F.E. (2010). Planta desalinizadora de agua de mar de 500m<sup>3</sup> diarios de capacidad que funciona mediante ósmosis inversa. *Técnica Industrial*, 287, p.44.

Sander, A.; Berghult, B.; Broo, A. E; Johansson, E. L; Hedberg, T. (1996). Iron corrosion in Drinking Water Distribution Systems-The effect of pH, calcium and hydrogen carbonate. *Corrosion science*, 38(3): 443-455.

Sandoval, M. & Ramírez, C (2007). El río Cauca en su valle alto: Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia. Santiago de Cali: Corporación autónoma regional del Valle del Cauca – CVC, Imprenta Universidad del Valle. 361 p.

Santore Zwitter (2009). PLAMAE - PLANO MUNICIPAL DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO. Parte A: Diagnóstico dos sistemas físicos, técnico-operacionais e gerenciais do serviço de água e esgoto. Contrato N.º 256/2009 Prefeitura Municipal de Presidente. Brasil. En línea [Accedido en Julio 16 de 2013] [http://www.presidenteprudente.sp.gov.br/outros/publica/PLAMAE/A/PLAMAE-DIAGNOSTICO\\_FINAL.pdf](http://www.presidenteprudente.sp.gov.br/outros/publica/PLAMAE/A/PLAMAE-DIAGNOSTICO_FINAL.pdf)

Sarin, P.; Snoeyink, V. L.; Bebee, J.; Jim, K. K.; Beckett, M. A. Kriven; W. M.; Clement, J. A. (2004). Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen. *Water Research*, 38(5): 1259–1269.

Schock R. M. (2002). Corrosión interna y control de deposición. En: *Calidad y Tratamiento del agua. Manual de los suministros de agua de la comunidad*. AWWA, Editor Raymond Letterman, Quinta Edición. Ed. Mc Graw Hill, España. 1048-1157p.

Shams, A. M. (2009). Three strategies for combating the corrosion of steel pipes carrying desalinated potable water. *Desalination*, 238(1): 166-173.

Sorlini, S.; Gialdini, F.; Collivignarelli, C. (2013). Metal leaching in drinking water domestic distribution system: an Italian case study. *International journal of environmental health research*, pp. 1-18.

Spellman, F. R. & Drinan, J. (2000). *Manual del agua Potable*. Editorial ACRIBIA, S.A. España. 256 p.

Stumm, W. & Morgan, J.J. (1996) *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. John Wiley & Sons, USA.

Sun, H.; Shi, B.; Bai, Y.; Wang, D. (2014a). Bacterial community of biofilms developed under different water supply conditions in a distribution system. *Science of The Total Environment*, 472: 99-107.



Sun, H.; Shi, B.; Lytle, D. A.; Bai, Y.; Wang, D. (2014b). Formation and release behavior of iron corrosion products under the influence of bacterial communities in a simulated water distribution system. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 16(3): 576-585.

Takasaki, S. & Yamada, Y. (2007). Effects of temperature and aggressive anions on corrosion of carbon steel in potable water. *Corrosion science*, 49(1): 240–247.

Tam, Y.S. & Elefsiniotis, P. (2009). Corrosion control in water supply systems: Effect of pH, alkalinity, and orthophosphate on lead and copper leaching from brass plumbing. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 44(12): 1251-1260.

Torres, P.; Pérez, A.; Cajigas, Á.; Otero, A.; González, M. (2008). Selección de acondicionadores químicos para el tratamiento anaerobio de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, No. 7: 66–74.

Trejo, R.; García, L. (2007). Modelación de la Deriva del pH en Función del Tiempo en Muestras de Agua Potable. *Conciencia Tecnológica*, (033): 12–16.

Trujillo F. E.; Miranda M. V. y Gutiérrez F. H. (2003). Tecnología informática para evaluar la agresividad del bióxido de carbono en el agua. En: Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas, RIPDA-CYTED y CIRA-UAEM, Editor Carlos Díaz Delgado, Libro digital. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd57/tecnologia.pdf>.

Trujillo, E.; Martínez, V.; Flores, N.S. (2006). Adecuación de la calidad química del agua potable para la infraestructura hidráulica con apoyo informático en Medioambiente en Iberoamérica. *Visión desde la Física y la Química en los albores del siglo XXI*. Tomo I. Gallardo, J. Editor. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental.

Trujillo, E.; Martínez, V.; Flores, N.S. (2008). Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono. *Inf. Tecnológica*, 19(6): 89 – 101.

Tukey, J.W. (1952). Reminder Sheets for Multiple Comparisons. In Braun, H.I. (Ed.), *The Collected Works of John W. Tukey*, Vol. VIII, New York: Chapman & Hall, 341-345.

Vargas, A.I.; Florez, A.A.; Gleen, L.M. (2009). Evaluación técnica del sistema de tratamiento de agua potable de la vereda palo solo del municipio de aguazul (Casanare). Especialista en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Varó Galván P.; Chillón M. F.; Prats D. (2004). Características Fisicoquímicas de las Aguas Ablandadas. *Ingeniería Química*. Universidad de Alicante. 146-150. Documento en línea: <http://www.google.académico.com> (Consultado: Octubre 20 de 2013).

Volk, C.; Dundore, E.; Schiermann, J.; LeChevallier, M. (2000). Practical evaluation of



iron corrosion control in a drinking water distribution system. *Water Research*, 34(6): 1967-1974.

WHO – World Health Organization (2011). “Guidelines for drinking-water quality”. 4<sup>th</sup> edition.

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. *Journal-American Water Works Association*, 102(3): 52-64.

Withers, A. (2005). Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants. *Desalination*, 179(1):11-24.

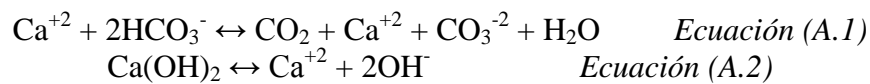
## 10. ANEXOS

### ANEXO 1. Cálculo del aporte de alcalinidad total (mgCaCO<sub>3</sub>/L) por cada mg/L de alcalinizante aplicado

Dentro de los aspectos técnicos de los diversos alcalinizantes aplicados al proceso de estabilización del pH, se presentan los resultados de la alcalinidad total aportada por cada mg/L de producto adicionado:

#### \* *Cal hidratada – Ca(OH)<sub>2</sub>*

Según las ecuaciones A.1 y A.2 se obtiene lo siguiente:



$$\begin{aligned} \text{Aporte de Alcalinidad total } \left( \frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}} \right) &= \\ \frac{1 \text{ mg Ca(OH)}_2}{\text{L}} * \frac{1 \text{ mol Ca(OH)}_2}{74.05 \text{ mg – mol Ca(OH)}_2} * \frac{1 \text{ mol Ca}^{+2}}{1 \text{ mol Ca(OH)}_2} * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol de Ca}^{+2}} * \frac{100.06 \text{ mg – mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3} &= \\ &= 1.35 \frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}} \end{aligned}$$

#### \* *Hidróxido de Sodio – NaOH*

Según el número de equivalentes del NaOH y el CaCO<sub>3</sub> se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Aporte de Alcalinidad total } \left( \frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}} \right) &= \\ \frac{1 \text{ mg NaOH}}{\text{L}} * \frac{1 \text{ equivalente NaOH}}{40 \text{ mg – mol NaOH}} * \frac{1 \text{ equivalente CaCO}_3}{1 \text{ equivalente de NaOH}} * \frac{50 \text{ mg – mol CaCO}_3}{1 \text{ equivalente CaCO}_3} &= \\ &= 1.25 \frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}} \end{aligned}$$

#### \* *Bicarbonato de Sodio – NaHCO<sub>3</sub>*

Según las ecuaciones A.1 y A.3 se obtiene lo siguiente:



$$\text{Aporte de Alcalinidad total } \left( \frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}} \right) =$$

$$\frac{1 \text{ mg NaHCO}_3}{L} * \frac{1 \text{ mol NaHCO}_3}{84.0 \text{ mg - mol NaHCO}_3} * \frac{1 \text{ mol HCO}_3^-}{1 \text{ mol NaHCO}_3} * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{2 \text{ mol de HCO}_3^-} * \frac{100.06 \text{ mg - mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3}$$

$$= 0,6 \frac{\text{mgCaCO}_3}{L}$$

**\* Carbonato de Sodio – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**

Según las ecuaciones A.1 y A.4 se obtiene lo siguiente:



$$\text{Aporte de Alcalinidad total} \left( \frac{\text{mgCaCO}_3}{L} \right) =$$

$$\frac{1 \text{ mg Na}_2\text{CO}_3}{L} * \frac{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3}{106.0 \text{ mg - mol Na}_2\text{CO}_3} * \frac{1 \text{ mol CO}_3^{-2}}{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3} * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol de CO}_3^{-2}} * \frac{100.06 \text{ mg - mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3}$$

$$= 0,94 \frac{\text{mgCaCO}_3}{L}$$

**\* Carbonato de Calcio – CaCO<sub>3</sub>**

Según las ecuaciones A.1 y A.5 se obtiene lo siguiente:



$$\text{Aporte de Alcalinidad total} \left( \frac{\text{mgCaCO}_3}{L} \right) =$$

$$\frac{1 \text{ mg CaCO}_3}{L} * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{100.06 \text{ mg - mol CaCO}_3} * \frac{1 \text{ mol CO}_3^{-2}}{1 \text{ mol CaCO}_3} * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol de CO}_3^{-2}} * \frac{100.06 \text{ mg - mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3}$$

$$= 1.0 \frac{\text{mgCaCO}_3}{L}$$

## ANEXO 2. Datos sin procesar de los ensayos de alcalinizantes

**Tabla A1.** Datos de los monitoreos para ensayos de diferentes alcalinizantes

Álcali.	Dosis	Conduc.	Turb.	pH	Temp.	Alcalinidad Total	Dureza total	Dureza cálcica	Cloruros	Sulfato	Sodio	Calcio	Magn.
	Unid. mg/L	Unid. uS/cm	Unid. UNT	Unid. Und	Unid. °C	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg Cl/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L
<b>ENSAYO</b>													
Blan co	0	107,7	0,21	6,1	22,2	6,3	28,4	16,2	21,7	7,1	3,5	6,49	2,96
CAL (1%)	2	112,3	0,42	6,95	21,8	8,0	34,8	22,6	24,6	9,4	-	9,06	2,96
	4	118,2	0,46	7,61	21,9	11,0	40,4	25,0	23,6	2,4	-	10,02	3,74
	6	124,8	0,68	8,89	21,9	14,0	40,8	28,2	24,6	11,3	-	11,30	3,06
	8	134,9	0,68	9,51	21,9	18,0	45,6	29,4	24,6	11,6	-	11,78	3,94
	10	138,9	0,68	9,69	21,9	20,5	46,6	35,0	24,6	22,1	-	14,03	2,82
	20	186,1	1,13	10,39	22,0	31,0	60,8	45,4	25,5	6,0	-	18,20	3,74
CAL (2%)	2	111,5	0,49	6,96	21,7	9,5	33,2	19,6	25,5	5,1	-	7,86	3,30
	4	119,1	0,52	7,86	21,7	13,0	36,8	22,4	24,6	7,8	-	8,98	3,50
	6	123,2	0,52	8,80	21,7	14,0	40,6	25,8	25,5	7,3	-	10,34	3,60
	8	124,9	0,62	9,02	21,7	15,0	45,2	26,4	26,4	3,7	-	10,58	4,57
	10	134,2	0,62	9,48	21,7	18,0	47,6	31,6	25,5	9,4	-	12,67	3,89
	20	160,8	1,09	10,08	21,8	28,0	54,6	41,2	25,5	4,9	-	16,51	3,26
CAL (4%)	2	119,2	0,61	7,01	21,6	12,0	36,2	23,0	24,6	6,5	-	8,82	3,21
	4	111,9	0,63	8,37	21,6	13,0	35,0	24,2	25,5	6,7	-	9,78	2,62
	6	120,5	0,69	8,55	21,7	14,0	40,6	26,4	25,5	4,6	-	10,82	3,45
	8	126,4	0,72	9,16	21,7	16,0	41,6	28,4	26,4	4,8	-	11,78	3,21
	10	142,1	0,74	9,74	21,7	21,0	46,0	30,4	25,5	4,6	-	12,50	3,79
	20	175,6	1,38	10,32	21,7	35,0	60,0	46,4	25,5	4,9	-	16,67	3,30

Álcali.	Dosis	Conduc.	Turb.	pH	Temp.	Alcalinidad Total	Dureza total	Dureza cálcica	Cloruros	Sulfato	Sodio	Calcio	Magn.
	Unid. mg/L	Unid. uS/cm	Unid. UNT	Unid. Und	Unid. °C	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg Cl/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L
NaOH (1%)	2	109,9	0,37	6,63	22,3	6,8	30,4	18,0	23,6	2,4	4,0	7,21	3,01
	4	115,1	0,36	7,02	22,1	9,0	31,0	18,2	21,7	1,0	6,0	7,29	3,11
	6	119,8	0,35	7,70	22,2	11,0	31,0	18,2	24,6	2,2	7,2	7,29	3,11
	8	125,6	0,34	8,77	22,2	13,0	31,0	18,2	23,6	4,9	8,5	7,29	3,11
	10	130,7	0,84	9,27	22,2	16,0	31,0	19,2	25,5	7,8	9,7	7,70	2,87
	20	162,6	0,98	10,02	22,3	28,0	31,4	19,4	25,5	7,5	16,2	7,78	2,92
NaOH (4%)	2	107,1	0,76	6,33	22,3	6,7	29,6	17,4	23,6	6,3	3,0	6,97	2,96
	4	115,7	0,96	7,05	22,2	11,0	29,6	17,4	25,5	6,5	5,6	6,97	2,96
	6	121,4	0,98	8,23	22,3	14,0	29,6	17,6	24,6	9,0	7,3	7,05	2,92
	8	127,7	1,02	9,09	22,2	16,0	29,6	17,6	26,4	8,7	8,7	7,05	2,92
	10	133,3	1,02	9,41	22,2	19,0	29,6	17,6	23,6	8,7	10,0	7,05	2,92
	20	170,0	1,06	10,16	22,2	31,0	32,4	20,2	26,4	9,2	17,1	8,10	2,96
NaHCO <sub>3</sub> (1%)	10	118,2	0,47	6,61	21,9	11,0	33,6	18,6	24,6	5,9	5,1	7,45	3,65
	20	128,6	0,61	6,77	21,9	12,0	35,8	20,6	26,4	7,8	8,2	8,26	3,69
	50	158,8	0,62	7,07	21,9	27,0	36,4	24,4	25,5	2,1	16,3	9,78	2,92
	130	238,0	0,67	7,51	21,9	69,8	36,4	24,6	24,6	7,8	38,5	9,86	2,87
	200	303,0	0,81	7,80	21,9	103,6	37,0	25,2	25,5	5,6	59,1	10,10	2,87
	250	355,0	0,99	8,01	22,0	134,2	38,2	26,6	25,5	7,8	68,8	10,66	2,82
NaHCO <sub>3</sub> (4%)	10	116,0	0,62	6,68	21,4	10,2	31,4	19,4	24,6	5,1	6,5	7,78	2,92
	20	125,8	0,64	6,83	21,4	12,0	32,6	19,6	25,5	4,4	12,1	7,86	3,16
	50	157,2	0,68	7,16	21,4	25,0	32,6	20,6	26,4	4,9	17,3	8,26	2,92
	130	237,0	0,70	7,60	21,4	51,4	32,6	20,8	25,5	4,6	37,6	8,34	2,87
	200	285,0	0,81	7,82	21,5	90,0	33,2	21,2	26,4	4,3	52,4	8,50	2,92
	250	358,0	0,91	8,06	21,5	127,0	33,4	21,4	25,5	5,4	65,3	8,58	2,92

Álcali	Dosis	Conduc.	Turb.	pH	Temp.	Alcalinidad Total	Dureza total	Dureza cálcica	Cloruros	Sulfato	Sodio	Calcio	Magn.
	Unid. mg/L	Unid. uS/cm	Unid. UNT	Unid. Und	Unid. °C	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg Cl/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1%)	10	118,0	0,50	6,53	22	12,6	32,0	18,2	23,6	2,4	5,8	7,29	3,35
	20	134,7	0,55	6,93	22,2	21,6	32,2	18,6	23,6	4,6	10,5	7,45	3,30
	50	163,0	0,63	7,28	22,3	31,4	32,6	19,0	23,6	3,3	27,3	7,62	3,30
	130	246,0	0,84	8,28	22,3	72,0	33,5	19,0	22,7	3,3	38,7	7,62	3,52
	200	320,0	1,06	8,82	22,3	112,0	35,8	19,8	23,6	13,7	61,0	7,94	3,89
	250	365,0	1,14	8,96	22,3	134,0	33,6	21,8	22,7	8,9	71,7	8,74	2,87
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (4%)	10	119,3	0,56	6,60	22,0	7,6	32,6	19,0	21,7	3,8	6,3	7,62	3,30
	20	132,7	0,58	6,86	22,0	11,0	32,8	19,6	22,7	4,1	10,5	7,86	3,21
	50	166,8	0,69	7,29	22,0	32,6	34,0	22,0	23,6	2,7	19,3	8,82	2,92
	130	267,0	0,95	8,51	22,0	80,0	35,4	22,6	22,7	2,4	45,9	9,06	3,11
	200	338,0	1,10	8,95	22,0	125,5	35,8	22,6	22,7	3,3	62,0	9,06	3,21
	250	395,0	1,19	9,10	22,0	219,8	36,0	23,4	23,6	3,3	92,6	9,38	3,06
<b>RÉPLICA</b>													
CAL (1%)	2	113,8	0,42	7,01	21,8	9,0	35,0	23,0	-	-	-	9,22	2,92
	4	121,8	0,43	8,17	21,8	14,0	40,2	28,4	-	-	-	11,38	2,87
	6	126,3	0,64	8,90	21,8	15,0	42,2	28,4	-	-	-	11,38	3,35
	8	132,9	0,66	9,40	21,9	18,0	43,8	30,2	-	-	-	12,10	3,30
	10	140,3	0,67	9,65	21,9	21,0	45,6	33,6	-	-	-	13,47	2,92
	20	187,0	1,04	10,36	21,8	37,0	61,8	48,8	-	-	-	19,56	3,16
CAL (2%)	2	118,6	0,46	7,93	21,8	8,0	35,8	21,2	-	-	-	8,50	3,55
	4	118,0	0,49	7,86	21,8	11,0	37,4	23,6	-	-	-	9,46	3,35
	6	121,0	0,53	8,66	21,8	13,0	38,4	26,8	-	-	-	10,74	2,82
	8	123,2	0,60	8,85	21,8	14,0	39,0	27,4	-	-	-	10,98	2,82
	10	131,3	0,62	9,40	21,8	16,0	45,2	27,6	-	-	-	11,06	4,28
	20	168,2	1,05	10,20	21,8	32,0	55,8	43,6	-	-	-	17,47	2,96

Álcali	Dosis	Conduc.	Turb.	pH	Temp.	Alcalinidad Total	Dureza total	Dureza cálcica	Cloruros	Sulfato	Sodio	Calcio	Magn.
	Unid. mg/L	Unid. uS/cm	Unid. UNT	Unid. Und	Unid. °C	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg Cl/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L
CAL (4%)	2	112,9	0,60	7,04	21,6	11,0	37,6	22,0	-	-	-	8,82	3,79
	4	119,5	0,62	8,44	21,6	13,0	40,6	24,4	-	-	-	9,78	3,94
	6	124,8	0,68	9,08	21,6	14,0	39,2	27,0	-	-	-	10,82	2,96
	8	129,4	0,71	9,38	21,6	16,0	41,8	29,4	-	-	-	11,78	3,01
	10	137,7	0,74	9,67	21,6	20,5	45,6	31,2	-	-	-	12,50	3,50
	20	170,1	1,29	10,26	21,6	33,0	55,2	41,6	-	-	-	16,67	3,30
NaOH (1%)	2	109,9	0,32	6,62	22,2	7,0	30,2	17,6	-	-	-	7,05	3,06
	4	114,6	0,30	6,97	22,3	10,0	31,2	18,3	-	-	-	7,33	3,13
	6	118,2	0,29	7,23	22,4	12,0	31,2	19,2	-	-	-	7,70	2,92
	8	125,4	0,29	8,87	22,4	15,0	32,2	19,2	-	-	-	7,70	3,16
	10	130,9	0,83	9,26	22,5	17,0	32,8	19,4	-	-	-	7,78	3,26
	20	162,7	0,90	10,03	22,5	30,0	33,4	19,4	-	-	-	7,78	3,40
NaOH (4%)	2	107,1	0,70	6,35	21,9	6,6	31,2	17,4	-	-	-	6,97	3,35
	4	116,0	0,82	7,12	21,9	9,0	31,2	17,4	-	-	-	6,97	3,35
	6	121,2	0,93	8,17	21,8	12,0	31,6	18,0	-	-	-	7,21	3,30
	8	127,1	0,97	9,03	21,9	16,0	32,4	18,8	-	-	-	7,54	3,30
	10	133,0	0,98	9,39	21,9	18,0	32,8	19,0	-	-	-	7,62	3,35
	20	167,7	1,01	10,14	21,8	30,0	32,8	20,0	-	-	-	8,02	3,11
NaHCO <sub>3</sub> (1%)	10	117,9	0,47	6,58	21,8	8,0	35,2	21,2	-	-	-	8,50	3,40
	20	127,9	0,64	6,77	21,9	12,0	35,4	21,2	-	-	-	8,50	3,45
	50	158,5	0,65	7,09	21,9	33,0	36,0	21,2	-	-	-	8,50	3,60
	130	239,0	0,67	7,58	21,9	50,0	36,2	24,0	-	-	-	9,62	2,96
	200	307,0	0,81	7,82	21,9	114,6	38,8	24,4	-	-	-	9,78	3,50
	250	357,0	0,90	8,02	21,9	134,6	39,2	25,2	-	-	-	10,10	3,40



Alcali	Dosis	Conduc.	Turb.	pH	Temp.	Alcalinidad Total	Dureza total	Dureza cálcica	Cloruros	Sulfato	Sodio	Calcio	Magn.
	Unid. mg/L	Unid. uS/cm	Unid. UNT	Unid. Und	Unid. °C	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg CaCO <sub>3</sub> /L	Unid. mg Cl/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L	Unid. mg/L
NaHCO <sub>3</sub> (4%)	10	115,6	0,63	6,68	21,7	13,4	32,6	20,6	-	-	-	8,26	2,92
	20	126,3	0,65	6,83	21,7	16,0	32,8	20,9	-	-	-	8,38	2,89
	50	156,9	0,69	7,17	21,8	31,0	32,8	21,4	-	-	-	8,58	2,77
	130	236,0	0,69	7,59	21,7	77,5	34,4	21,8	-	-	-	8,74	3,06
	200	294,0	0,73	7,84	21,7	103,3	35,2	22,1	-	-	-	8,86	3,18
	250	343,0	0,92	7,99	21,7	126,0	36,8	22,3	-	-	-	8,94	3,52
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1%)	10	119,0	0,49	6,57	22,0	13,5	31,8	18,8	-	-	-	7,54	3,16
	20	132,3	0,56	6,84	22,2	17,0	33,0	19,2	-	-	-	7,70	3,35
	50	157,4	0,62	7,14	22,2	32,4	33,0	19,6	-	-	-	7,86	3,26
	130	236,0	0,83	8,19	22,1	70,0	33,3	20,8	-	-	-	8,34	3,04
	200	320,0	1,00	8,80	22,0	119,8	33,8	21,6	-	-	-	8,66	2,96
	250	369,0	1,11	8,96	22,0	133,0	34,0	22,2	-	-	-	8,90	2,87
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (4%)	10	120,1	0,57	6,62	22,0	7,0	29,6	20,2	-	-	-	8,10	2,28
	20	131,7	0,59	6,88	22,1	18,0	32,0	21,4	-	-	-	8,58	2,58
	50	168,3	0,75	7,35	22,1	36,0	33,8	22,0	-	-	-	8,82	2,87
	130	265,0	0,96	8,61	22,1	90,0	35,2	22,2	-	-	-	8,90	3,16
	200	335,0	0,97	8,98	22,1	123,7	36,2	22,8	-	-	-	9,14	3,26
	250	507,0	1,02	9,24	22,0	220,2	37,0	24,0	-	-	-	9,62	3,16

## ANEXO 3. Resultados del diseño experimental

### A3.1 Pruebas de hipótesis sobre el efecto de los factores – ANOVA

En las Tablas A2 a A6, se presenta el Análisis de Varianza para cada uno de los índices, teniendo en cuenta que se fue necesario realizar una transformación logarítmica del IFC.

**Tabla A2.** Análisis de varianza para logIFC, utilizando suma de cuadrados ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
pH	1	801,142	2,464	2,464	367,83	0,000
Dureza Calcica	1	0,022	0,099	0,099	14,74	0,000
Alcalinidad	1	77,490	0,355	0,355	52,91	0,000
Mezcla	1	0,090	0,021	0,021	3,09	0,086
Alcalinizante	3	5,426	0,035	0,012	1,76	0,168
Dosis (Alcalinizante)	20	7,821	7,452	0,373	55,61	0,000
Mezcla*Alcalinizante	3	0,247	0,259	0,086	12,90	0,000
Mezcla*Dosis (Alcalinizante)	20	0,542	0,542	0,027	4,05	0,000
Error	45	0,302	0,302	0,007		
Total	95	893,081				

**Tabla A3.** Análisis de varianza para ISL, utilizando suma de cuadrados ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
pH	1	165,0221	0,4974	0,4974	449,29	0,000
Calcio	1	0,1049	0,0222	0,0222	20,04	0,000
Alcalinidad	1	11,9288	0,0644	0,0644	58,13	0,000
Mezcla	1	0,0131	0,0026	0,0026	2,31	0,135
Alcalinizante	3	0,8174	0,0042	0,0014	1,27	0,297
Dosis (Alcalinizante)	20	0,9868	0,9608	0,0480	43,39	0,000
Mezcla*Alcalinizante	3	0,0409	0,0515	0,0172	15,50	0,000
Mezcla*Dosis (Alcalinizante)	20	0,0992	0,0992	0,0050	4,48	0,000
Error	45	0,0498	0,0498	0,0011		
Total	95	179,0629				

**Tabla A4.** Análisis de varianza para PPCC, utilizando suma de cuadrados ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
pH	1	8853,33	13,94	13,94	9,41	0,004
Calcio	1	1348,93	0,04	0,04	0,03	0,870
Alcalinidad	1	739,05	5,83	5,83	3,93	0,054
Mezcla	1	5,45	2,15	2,15	1,45	0,235
Alcalinizante	3	672,17	54,63	18,21	12,29	0,000
Dosis (Alcalinizante)	20	881,65	837,67	41,88	28,26	0,000
Mezcla*Alcalinizante	3	101,61	117,40	39,13	26,41	0,000
Mezcla*Dosis (Alcalinizante)	20	170,77	170,77	8,54	5,76	0,000
Error	45	66,69	66,69	1,48		
Total	95	12839,64				

**Tabla A5.** Análisis de varianza para IER, utilizando suma de cuadrados ajustada para pruebas

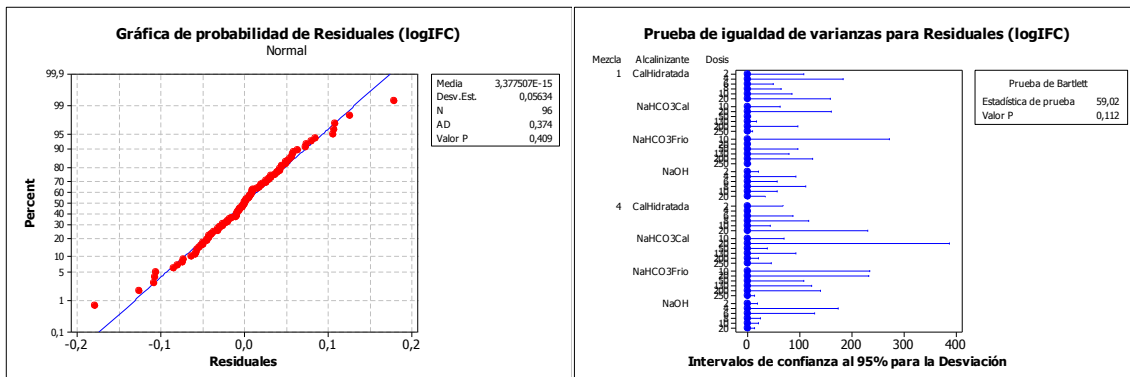
Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
pH	1	203,7730	0,4754	0,4754	92,27	0,000
Dureza Calcica	1	0,3852	0,0562	0,0562	10,91	0,002
Alcalinidad	1	47,6847	0,2728	0,2728	52,96	0,000
Mezcla	1	0,0589	0,0225	0,0225	4,37	0,042
Alcalinizante	3	3,3248	0,0167	0,0056	1,08	0,366
Dosis (Alcalinizante)	20	3,9630	3,8224	0,1911	37,10	0,000
Mezcla*Alcalinizante	3	0,1631	0,1743	0,0581	11,28	0,000
Mezcla*Dosis (Alcalinizante)	20	0,3520	0,3520	0,0176	3,42	0,000
Error	45	0,2318	0,2318	0,0052		
Total	95	259,9364				

**Tabla A6.** Análisis de varianza para IA, utilizando suma de cuadrados ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
pH	1	179,1952	0,5206	0,5206	497,63	0,000
Dureza Calcica	1	0,3522	0,0184	0,0184	17,54	0,000
Alcalinidad	1	12,2438	0,0627	0,0627	59,97	0,000
Mezcla	1	0,0094	0,0040	0,0040	3,84	0,056
Alcalinizante	3	0,8903	0,0065	0,0022	2,08	0,116
Dosis (Alcalinizante)	20	0,9340	0,8839	0,0442	42,24	0,000
Mezcla*Alcalinizante	3	0,0459	0,0446	0,0149	14,22	0,000
Mezcla*Dosis (Alcalinizante)	20	0,0808	0,0808	0,0040	3,86	0,000
Error	45	0,0471	0,0471	0,0010		
Total	95	193,7988				

### A3.2 Validación de supuestos del Modelo

Con la finalidad de interpretar los resultados obtenidos a partir del ANOVA, se deben validar los supuestos para todos los diseños planteados, donde el valor-p de la prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas es superior a  $\alpha = 0.05$ . A continuación se presentan las Figuras A1 a A5 de los resultados obtenidos para cada índice.



**Figura A1.** Resultados de Normalidad y de Homogeneidad de Varianzas para la variable IFC

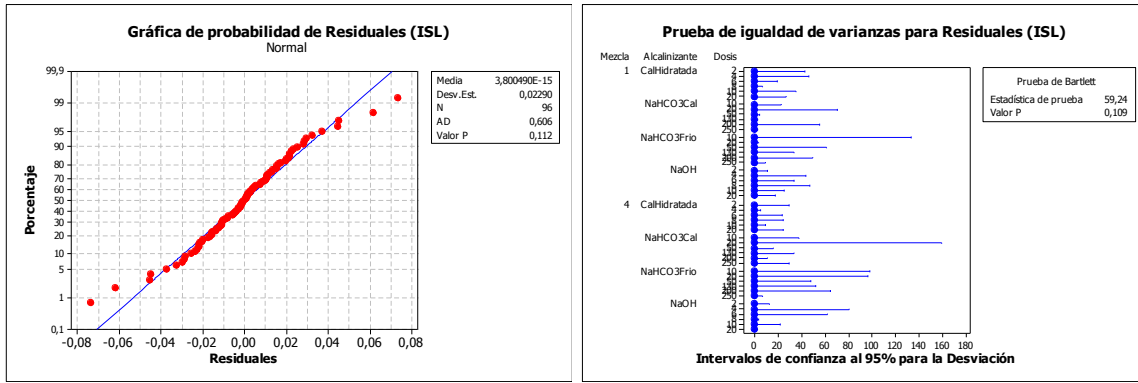


Figura A2. Resultados de Normalidad y de Homogeneidad de Varianzas para la variable ISL

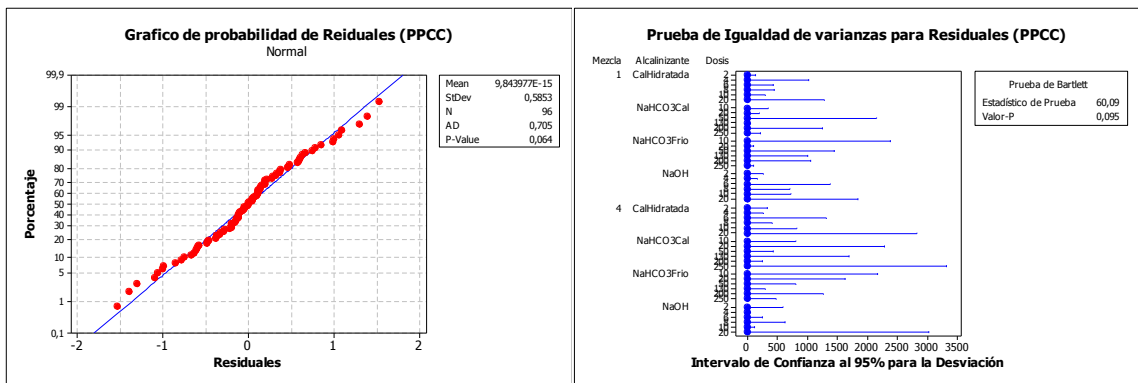


Figura A3. Resultados de Normalidad y de Homogeneidad de Varianzas para la variable PPCC

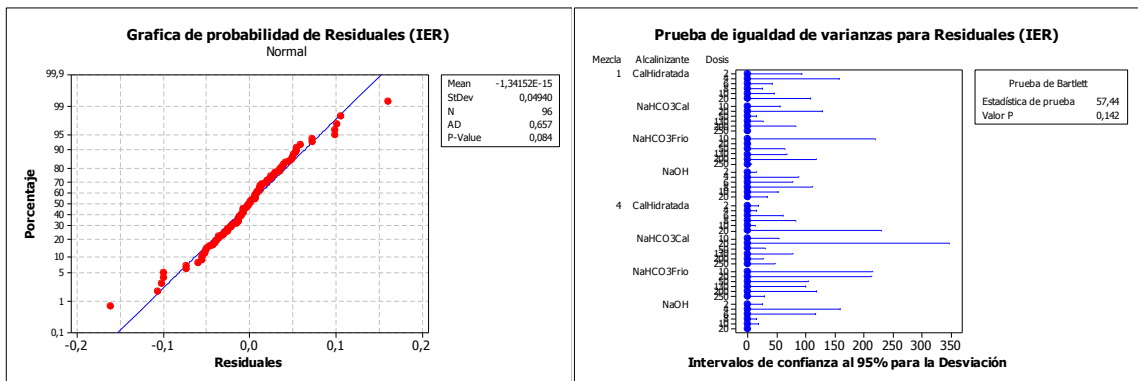
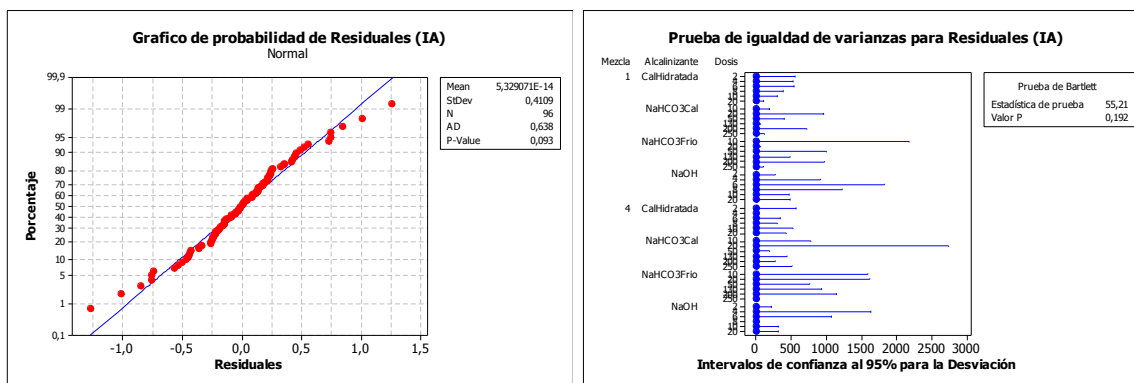


Figura A4. Resultados de Normalidad y de Homogeneidad de Varianzas para la variable IER



**Figura A5.** Resultados de Normalidad y de Homogeneidad de Varianzas para la variable IA

Mediante las Tablas de análisis de varianza A1 a A5 se puede observar que la hipótesis nula de interacción entre la mezcla (Solución de concentración de aplicación) y la dosis anidada al alcalinizante (Mezcla\*Dosis(Alcalinizante)) se rechaza a un nivel de significancia del 5% debido a que su valor-p es aproximadamente cero, lo cual indica que los índices de estabilización del pH dependen de la dosis, el tipo de alcalinizante y la solución de concentración de aplicación; además se evidencia una relación entre las tres covariables consideradas con los índices IFC, ISL, IER y IA, mientras que para el índice PPCC solo se evidencio relación con el pH.

### A3.3 Pruebas de Comparación Múltiples

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de comparación múltiples para cada índice de estabilización.

**Tabla A7.** Pruebas de comparación Múltiple de Tukey para la variable log(IFC)

Mezcla 1%		Diferencia de Medias	Valor-P	Mezcla 4%		Diferencia de Medias	Valor-P
CalHidratada	NaOH	0,132	0,9922	CalHidratada	NaOH	0,02012	1
CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,4292	0,6359	CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,40629	0,6781
CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,5231	0,3665	CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,06134	1
NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,2972	0,677	NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,3862	0,3503
NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,3911	0,1801	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,04122	1
NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,0939	0,9427	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,34494	0,0182

CalHidratada		Diferencia de Medias	Valor-P	NaHCO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,1038	0,2282	1%	4%	0,0809	0,5603

NaOH		Diferencia de Medias	Valor-P	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,00804	1	1%	4%	0,3579	0

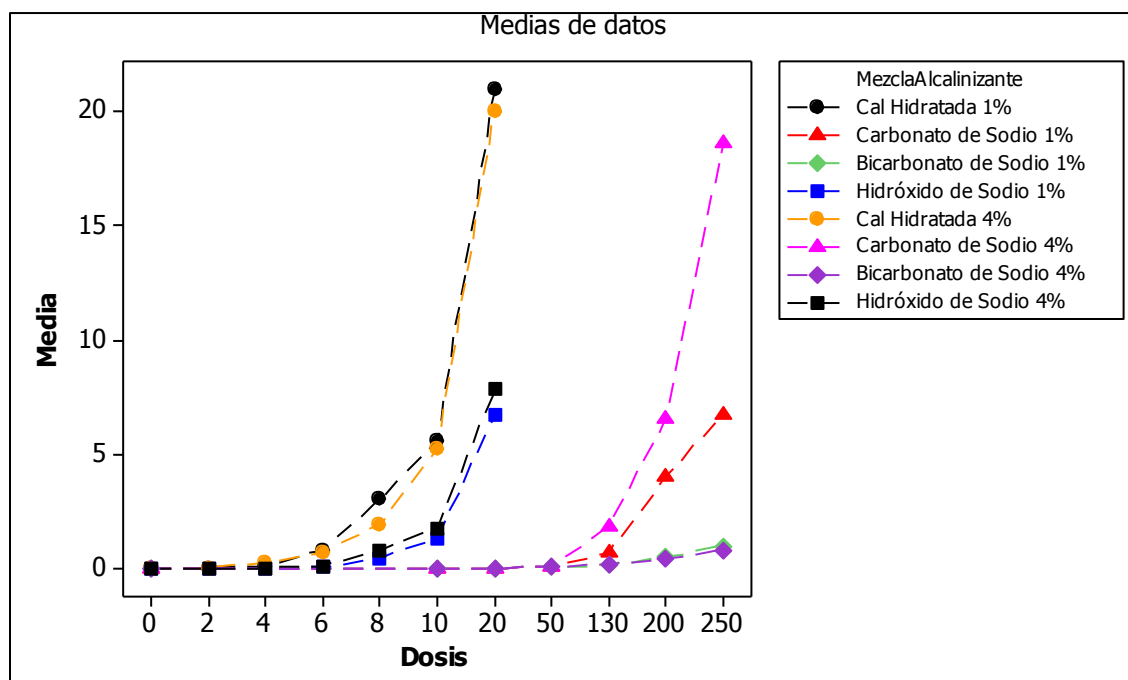


Figura A6. Interacción de factores para IFC

Los resultados evidencian que para el índice IFC existen diferencias significativas entre los alcalinizantes  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para la mezcla al 4%, así como también se observan diferencias entre las mezclas al 1% y 4% para el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . En la Figura A6 se puede observar que las diferencias para el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se presentan para dosis a partir de 130 mg/L.

Tabla A8. Pruebas de comparación Múltiple de Tukey para la variable ISL

Mezcla 1%		Diferencia de Medias	Valor-P	Mezcla 4%		Diferencia de Medias	Valor-P
CalHidratada	NaOH	0,1002	0,8979	CalHidratada	NaOH	0,055644	0,9903
CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,15635	0,7958	CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,14846	0,8186
CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,21439	0,4639	CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,002454	1
NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,0562	0,9925	NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,09282	0,8839
NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,1142	0,5762	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,0581	0,995
NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,058	0,6836	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,15091	0,0079

CalHidratada		Diferencia de Medias	Valor-P	NaHCO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,05093	0,1502	1%	4%	0,043	0,2867

NaOH		Diferencia de Media	Valor-P	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,00637	0,9999	1%	4%	0,1659	0

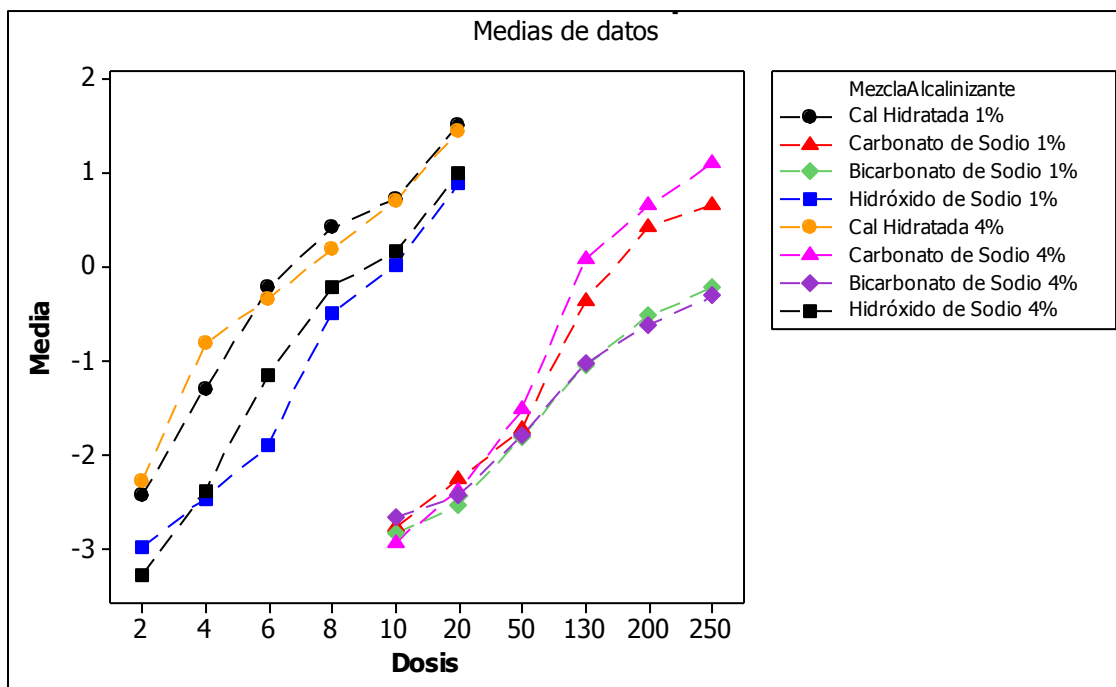


Figura A7. Interacción de factores para ISL

Los resultados evidencian que el índice ISL existen diferencias significativas entre los alcalinizantes  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para la mezcla al 4%, así como también se observan diferencias entre las mezclas al 1% y 4% en el alcalinizante  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Según la Figura A7 se puede observar que las diferencias para el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se presentan para dosis a partir de 130 mg/L.

Tabla A9. Pruebas de comparación Múltiple de Tukey para la variable PPCC

Mezcla 1%		Diferencia de Medias	Valor-P	Mezcla 4%		Diferencia de Medias	Valor-P
CalHidratada	NaOH	6,391	0,3437	CalHidratada	NaOH	7,358	0,0763
CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	3,37	0,9853	CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	1,99	0,9994
CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,228	1	CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6,453	0,6667
NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	3,021	0,9359	NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	5,368	0,4324
NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5,163	0,309	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	13,81	0,0004
NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2,142	0,6742	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8,44	0

CalHidratada		Diferencia de Medias	Valor-P	NaHCO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	1,549	0,3477	1%	4%	0,169	1

NaOH		Diferencia de Medias	Valor-P	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	2,516	0,0028	1%	4%	6,132	0



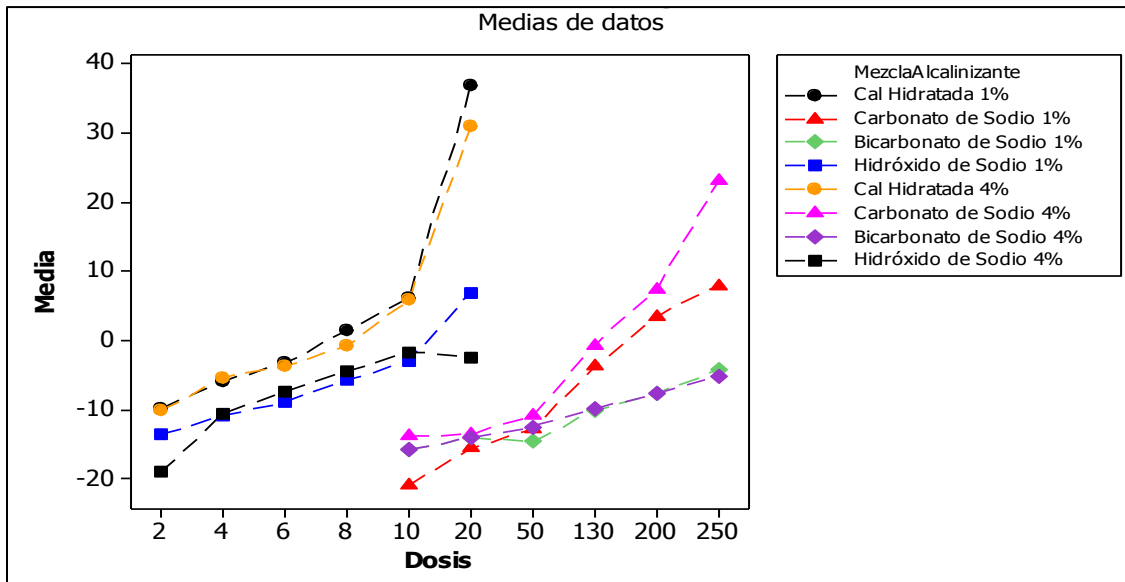


Figura A8. Interacción de factores para PPCC

La anterior tabla evidencia que para el índice PPCC existen diferencias significativas entre los alcalinizantes  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , así como para los alcalinizantes  $\text{NaOH}$  y  $\text{NaHCO}_3$   $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para la mezcla al 4%. También se observan diferencias entre las mezclas al 1% y 4% en el alcalinizante  $\text{NaOH}$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Según la Figura A8 se puede observar que las diferencias entre los alcalinizantes  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se presentan para dosis a partir de 130 mg/L, así como también para las mezclas 1% y 4% en el alcalinizante  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Las diferencias entre las mezclas 1% y 4% se presentan para el alcalinizante  $\text{NaOH}$  se presenta para dosis a 2 mg/L y 20 mg/L.

Tabla A10. Pruebas de comparación Múltiple de Tukey para la variable IER

Mezcla 1%		Diferencia de Medias	Valor-P	Mezcla 4%		Diferencia de Medias	Valor-P
CalHidratada	NaOH	0,0134	1	CalHidratada	NaOH	0,0638	0,9996
CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,1358	0,998	CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,133	0,9981
CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,2044	0,9745	CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,1596	0,9945
NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,14927	0,9746	NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,1968	0,894
NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,21779	0,7143	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,0958	0,9991
NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,06852	0,9786	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,2926	0,0249

CalHidratada		Diferencia de Medias	Valor-P	NaHCO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,0571	0,7724	1%	4%	0,05422	0,8293

NaOH		Diferencia de Medias	Valor-P	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,0067	1	1%	4%	0,3069	0

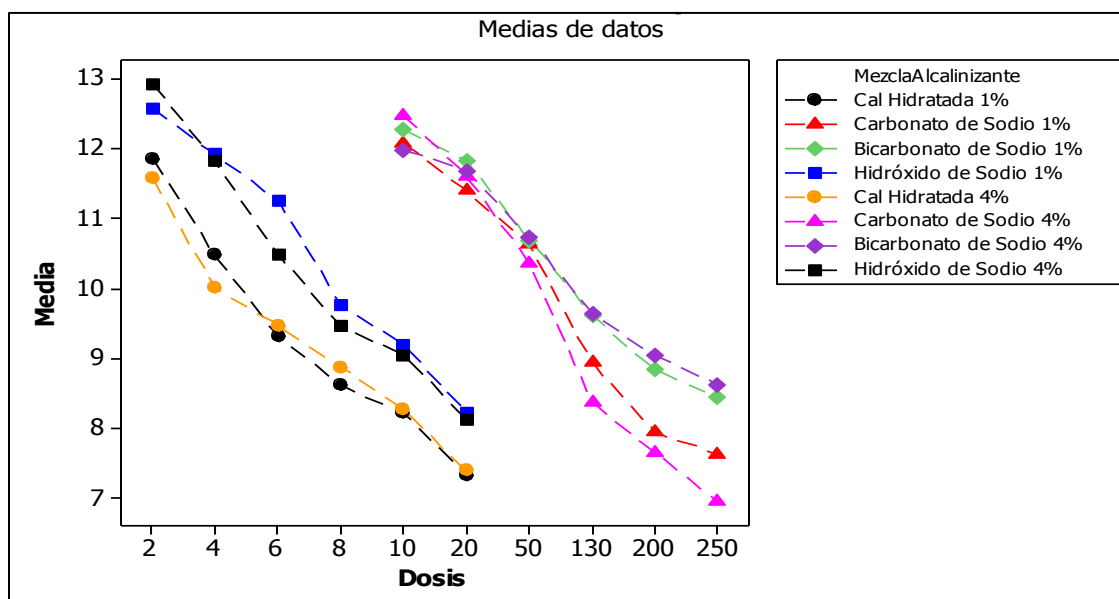


Figura A9. Interacción de factores para IER

Los resultados evidencian que para el índice IER existen diferencias significativas entre los alcalinizantes  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para la mezcla al 4%, así como también se observan diferencias entre las mezclas al 1% y 4% en el alcalinizante  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Según la Figura A9 se puede observar que las diferencias se presentan para dosis a partir de 130 mg/L.

Tabla A11. Pruebas de comparación Múltiple de Tukey para la variable IA

Mezcla 1%		Diferencia de Medias	Valor-P	Mezcla 4%		Diferencia de Medias	Valor-P
CalHidratada	NaOH	0,0054	1	CalHidratada	NaOH	0,01615	1
CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,10429	0,9546	CalHidratada	NaHCO <sub>3</sub>	0,11291	0,926
CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,12828	0,8657	CalHidratada	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,04723	0,9996
NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,1097	0,746	NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	0,1291	0,5634
NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,1337	0,34	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,03108	0,9999
NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,024	0,9952	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,16014	0,003

CalHidratada		Diferencia de Medias	Valor-P	NaHCO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,02445	0,8134	1%	4%	0,0331	0,5183

NaOH		Diferencia de Medias	Valor-P	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		Diferencia de Medias	Valor-P
1%	4%	0,0137	0,9879	1%	4%	0,1511	0

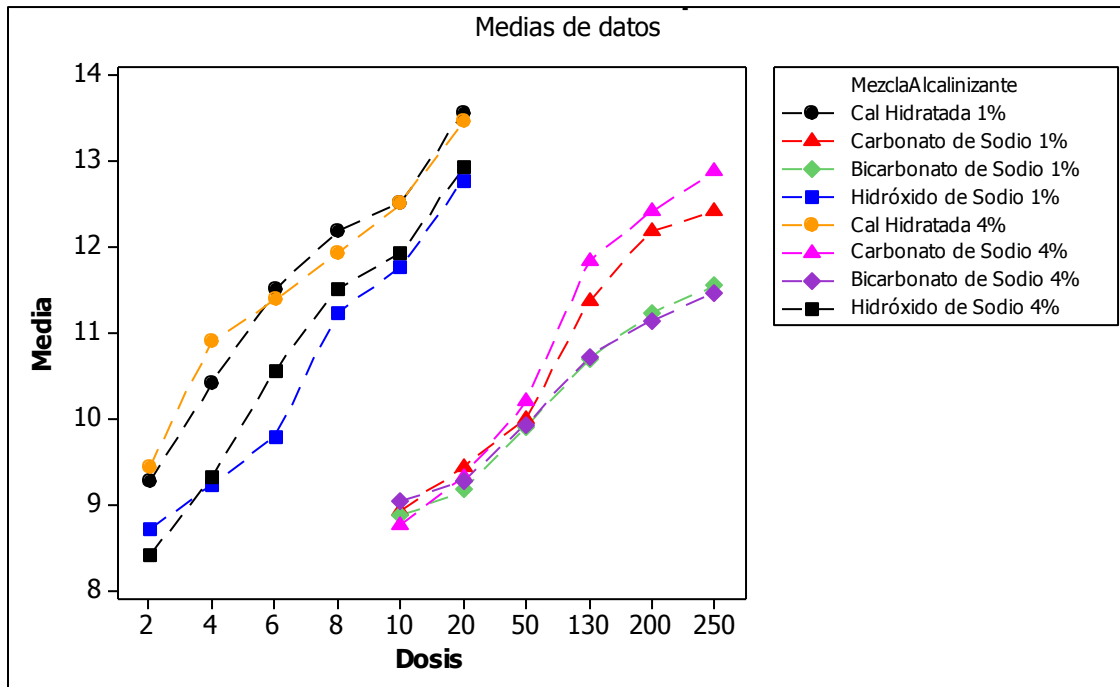


Figura A10. Interacción de factores para IA

Los resultados evidencian que para el índice IA existen diferencias significativas entre los alcalinizantes  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para la mezcla al 4%, así como también se observan diferencias entre las mezclas al 1% y 4% en el alcalinizante  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Según la Figura A10 se puede observar que las diferencias se presentan para dosis a partir de 130 mg/L.

Como conclusiones se encontró que todos los índices de estabilización del pH presentan un efecto de interacción entre los tres factores considerados (% de mezcla, Alcalinizante y dosis), lo cual indica que cada uno de los índices se debe analizar teniendo en cuenta los tres factores de manera conjunta y no individual.

Mediante las pruebas de comparación múltiple se evidenció que todos los índices evaluados presentaron diferencias significativas entre los alcalinizantes Bicarbonato de Sodio y Carbonato de Sodio en la mezcla al 4%, así como también entre las mezclas al 1% y 4% en el Carbonato de Sodio.

Los alcalinizantes Cal Hidratada, Hidróxido de Sodio y Bicarbonato de Sodio no presentaron diferencias significativas entre las mezclas al 1% y 4%, lo cual indica que al emplear cualquiera de los tres alcalinizantes no interesa a que porcentaje de mezcla se aplique debido a que producirá similares valores de los índices de estabilización.