

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Evaluación de tecnologías de cloración mediante sistemas de pastillas y cloro líquido
controlado con ORP en agua para consumo humano”**

Marvin Darío Vargas Portuguez

CARTAGO, Agosto, 2021



“Evaluación de tecnologías de cloración mediante sistemas de pastillas y cloro líquido controlado con ORP en agua para consumo humano”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

Dr. Luis G. Romero Esquivel
Director

Ing. Macario Pino Gómez
Lector 1

Ing. Laura Ureña Vargas
Lector 2

MSc. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinador COTRAFIG

MGA. Ricardo Coy Herrera
Directora Escuela de Química

MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A mi Dios y a mis padres Patricia y Marvin, que siempre confiaron en mí y me brindaron su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo incondicional, porque sin ellos no habría sido posible lograr culminar este proceso.

A los profesores Luis G. Romero y Macario Pino, por sus consejos y guía durante el proceso, que fue sumamente enriquecedor.

A mis tíos Rosalía Solano, Eduardo Solano y su familia, por el tiempo que me aceptaron en su casa como un miembro más de su hogar.

A Don José Cordero y su señora esposa Flor Cedeño, por su soporte y amistad durante los días de muestreo en la ASADA de Cooperosales.

A todos mis amigos, que siempre me apoyaron durante la etapa universitaria, en especial a José Pablo Angulo y a Ricardo González.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	18
Abstract	21
1 Introducción	22
1.1 <i>Objetivos</i>	24
1.1.1 Objetivo general:	24
1.1.2 Objetivos específicos	24
2 Revisión de literatura	25
2.1 <i>Situación del agua potable</i>	25
2.1.1 Situación a nivel mundial	25
2.1.2 Situación nacional	26
2.2 <i>Generalidades de la desinfección</i>	27
2.2.1 Tipos de desinfección	27
2.2.2 Desinfección con cloro	31
2.2.3 Variables de control en sistemas de cloración	32
2.2.3.1 Propiedades químicas del cloro	32
2.2.3.2 Tiempo de contacto	34
2.2.3.3 Dosis óptima y demanda de cloro	35
2.3 <i>Métodos de cloración</i>	36
2.3.1 Uso de cloro líquido	36
2.3.2 Uso de cloro sólido	37
2.4 <i>Medición de la dosificación de cloro</i>	40
2.4.1 Métodos químicos	40
2.4.2 Métodos basados en potencial oxido reducción (ORP)	41
3 Materiales y métodos	46
3.1 <i>Cooperosales</i>	46
3.1.1 Descripción del sitio	46
3.1.2 Determinación de la demanda de cloro	49
3.1.2.1 Recolección de la muestra	49
3.1.2.2 Preparación de la disolución madre de 100 ppm de cloro	49
3.1.2.3 Demanda de cloro	49

3.1.3	Monitoreo de la concentración de Cloro libre en la ASADA de Cooperosales	50
3.1.3.1	Determinación de cloro	50
3.1.3.2	Sitios seleccionados para llevar a cabo los muestreos	51
3.1.3.2.1	Muestreo al clorador artesanal de cámara seca	51
3.1.3.2.2	Muestreos a los cloradores instalados en el tanque de mezcla	51
3.1.4	Cloradores	53
3.1.4.1	Clorador artesanal de cámara seca original de Cooperosales	53
3.1.4.2	Clorador Accu-Tab:	54
3.1.4.3	Evaluación y mejoras al clorador artesanal de cámara seca original de Cooperosales	55
3.1.4.4	Desarrollo del clorador artesanal de cámara húmeda	57
3.1.5	Caudales teóricos del agua cruda al entrar al sistema	58
3.2	<i>Centro comercial</i>	59
3.2.1	Descripción del sitio	59
3.2.1.1	Sistema de Cloración	60
3.2.1.2	Monitoreo del cloro libre en el centro comercial	61
3.3	<i>Análisis de los datos por cambios en la legislación</i>	62
4	Resultados y discusión	63
4.1	<i>Estudio de caso: Cooperosales</i>	63
4.1.1	Demanda de cloro	63
4.1.2	Monitoreo del cloro libre en ASADA de Cooperosales	64
4.1.2.1	Clorador Artesanal de cámara seca original de Cooperosales	65
4.1.2.2	Clorador Accu-Tab	66
4.1.2.3	Clorador Artesanal de cámara seca modificado	70
4.1.2.4	Clorador Artesanal de cámara húmeda desarrollado	72
4.1.3	Efecto del caudal del sistema y el clorador en concentración del cloro en el agua tratada	76
4.2	<i>Caso de estudio: Centro comercial</i>	77
4.2.1	Automatización del proceso de desinfección	77
4.3	<i>Análisis de los datos por cambios en la legislación</i>	80
5	Conclusiones y recomendaciones	82
5.1	<i>Conclusiones</i>	82
5.2	<i>Recomendaciones</i>	82

6	Referencias	85
	Apéndices	93
	Apéndice 1: Fotografías de la ASADA de Cooperosales	95
	Apéndice 2: Dosificación de la disolución madre (100 ppm) para analisis de curva de demanda de cloro	100
	Apéndice 3: Resultados de la demanda de cloro	101
	Apéndice 4: Datos cloro libre del clorador artesanal de cámara seca, ASADA Cooperosales	102
	Apéndice 5: Datos del clorador Accu-Tab, con caudal menor a 1,0 L/min	103
	Apéndice 6: Datos Recabados para el clorador Accu Tab	104
	Apéndice 7: Datos del clorador artesanal de cámara seca modificado, con caudal menor a 1,0 L/min	107
	Apéndice 8: Datos recabados para el clorador Artesanal de cámara seca modificado	108
	Apéndice 9: Datos recabados para el clorador Artesanal de cámara húmeda desarrollado	110
	Apéndice 10: Datos de cloro libre medidos en la casa N° 115, ASADA de Cooperosales – Clorador artesanal cámara húmeda	111
	Apéndice 11: Datos ORP medidos en el centro comercial	116
	Apéndice 12: Cálculo de la concentración de cloro libre en el tanque de mezcla	118
	Anexos	121
	Anexo 1: Gráfico de dosificación para el clorador Accu-Tab 3012	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Porcentaje de variación entre el ácido hipocloroso e ion hipoclorito con el pH a diferentes temperaturas (Amoedo-Cabaleiro, 2005; Faust & Aly, 1998).....	34
Figura 2.2 Curva de punto de quiebre para el cloro (Modificada de Ritter (2010)).....	36
Figura 2.3 Clorador de cámara seca (Mora-Castro, 2011)	38
Figura 2.4 Clorador de cámara húmeda.....	39
Figura 2.5 Variación del ORP por el cloro libre en función del pH (modificado de Steininger, 1985).....	43
Figura 2.6 Configuración aplicada al caso de estudio	45
Figura 3.1 Ubicación de la ASADA con la que se trabajó	47
Figura 3.2 Distribución de los elementos de las instalaciones de desinfección a Junio de 2019	48
Figura 3.3 Distribución general de los elementos presentes en la ASADA de Cooperosales	49
Figura 3.4 Detalle del tanque de mezcla.....	52
Figura 3.5 Ubicación del Punto C de muestreo	53
Figura 3.6 Clorador artesanal de cámara seca	54
Figura 3.7 Clorador Accu-Tab	55
Figura 3.8 Clorador artesanal de cámara seca y con sus mejoras.....	56
Figura 3.9 Dispensador para la distribución del agua cruda sobre la pastilla.....	57
Figura 3.10 Clorador artesanal de cámara húmeda y su posicionamiento	58
Figura 3.11 Ubicación del centro comercial donde se instaló el sistema ORP	60
Figura 3.12 (a) Diagrama de la distribución de los componentes del sistema de cloración automatizada (b) fotografía del sistema de dosificación	61
Figura 4.1 Curva demanda de cloro aplicada el día 12 de marzo de 2020.....	64
Figura 4.2 Dosificación de cloro libre con clorador artesanal de cámara seca, año 2019....	66
Figura 4.3 Dosificación de cloro libre con clorador Accu-Tab y flujómetro de 2,0 a 20,0 L/min, año 2019.....	67
Figura 4.4 Dosificación de cloro libre con clorador Accu-Tab y flujómetro de 0,4 a 4,0 L/min, año 2019.....	69

Figura 4.5 Dosificación de cloro libre con clorador artesanal de cámara seca modificado y flujómetro de 0,4 a 4,0 L/min, año 2019	71
Figura 4.6 Implementación del difusor de agua cruda sobre la pastilla (A) sin difusor (B) con difusor.....	72
Figura 4.7 Dosificación de cloro libre con clorador artesanal de cámara húmeda y flujómetro de 0,4 a 4,0 L/min, año 2020	73
Figura 4.8 Colocación de las pastillas de ácido tricloroisocianúrico (A) enteras y (B) partidas	74
Figura 4.9 Dosificación de cloro libre con el clorador artesanal de cámara húmeda de julio a diciembre 2020	75
Figura 4.10 (A) Caudales medidos con equipo ultrasónico en la ASADA de Cooperosales (Barret, 2019) y (B) caudales teóricos del clorador artesanal de cámara seca modificado	77
Figura 4.11 Datos de dosificación de cloro libre controlador por sistema ORP para los meses de (A) noviembre 2020, (B) enero 2021.....	79

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1 Entes administradores de agua potable y su distribución porcentual de abastecimiento para el 2016 (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2018).....	26
Cuadro 2.2 Parámetros relacionados con la desinfección del agua (Ministerio de Salud, 2020)	27
Cuadro 2.3 Diferentes métodos de desinfección aplicados a agua potable	28
Cuadro 2.4 Propiedades registradas para el cloro (Arboleda-Valencia, 2000; Cheremisinoff, 2002).....	31
Cuadro 2.5 Semirreacciones de potencial estándar para especies formadas por el cloro (White, 2010).....	33
Cuadro 2.6 Tiempo de contacto (en minutos) para inactivación de microorganismos patógenos (Vargas <i>et al.</i> , 2004).....	34
Cuadro 2.7 Resultados de estudios de simulación de laboratorio y de encuestas de hidrogenfriadores comerciales (Suslow, 2004)	44

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

A y A	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
ASADA	Asociación Administradora de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunal
CAAR	Comités Administradores de Acueductos Rurales
COT	Carbono Orgánico Total
EPA	United States Environmental Protection Agency
ESPH	Empresa de Servicios Públicos de Heredia
OMS	Organización Mundial de la Salud
ORP	Potencial de oxidación-reducción
SPD	Sub productos de desinfección
MON	Materia orgánica natural
THM	Trihalometanos
AHA	Ácidos haloacéticos
TD	Tiempo de contacto contra dosis de cloro
WHO	World Health Organization

RESUMEN

La desinfección de agua potable a pequeña escala en Costa Rica presenta grandes retos por ser, en la mayoría de los casos, realizada de forma empírica por el personal encargado. En este proyecto se evaluó y modificó el sistema de cloración por pastillas de la ASADA Cooperosales, Cartago. Además, se evaluó un sistema de desinfección con cloro líquido controlado mediante un sensor de potencial de oxidación-reducción (ORP) ubicado en un centro comercial en San José. En el acueducto se utilizaron cuatro cloradores distintos para probar su efectividad, estos fueron un clorador artesanal de cámara seca con problemas de diseño, un clorador comercial marca Accu-Tab de cámara seca, luego se probó con el mismo artesanal de cámara seca con la adición de un flujómetro y llaves de chorro y, por último, un clorador artesanal de cámara húmeda. También, en la ASADA se implementó un tanque de premezcla para realizar la cloración previa a los tanques de almacenamiento. La eficacia de los cambios en la ASADA y del sistema automatizado en el centro comercial se verificó por monitoreo de cloro libre. En la ASADA, se observó una mejoría importante al implementar el tanque de premezcla, sin embargo, en las lecturas de cloro libre a la salida de los tanques de almacenamiento evidenciaron gran variación en los niveles de cloro a lo largo del día, siendo difícil cumplir con la legislación (0,3 a 0,6 mg/L). En el sistema controlado por ORP el nivel de cloro estuvo durante más tiempo acorde con la legislación. Para el caso de cloración por pastillas se recomienda evaluar su automatización mediante el control del caudal de ingreso a los cloradores, por ejemplo, con sensores ORP. En el uso de tecnologías ORP se recomienda complementar con medición y regulación de pH, además de darles un mantenimiento y limpieza constantes. Además, debido a la pandemia causada por la enfermedad COVID-19 la norma N° 38924-S amplió el límite superior de cloro libre resultando en un rango que va desde 0,3 mg/L hasta 1,0 mg/L, logrando un aumento en los porcentajes de cumplimiento de la norma en cloro libre residual para las mediciones que se llevaron a cabo en la mayoría de los sistemas analizados. Por tanto, es recomendable evaluar el mantener la norma en dicho rango.

Palabras clave: Agua potable, sistemas pequeños, Asadas, Desinfección, ORP, Cloración con pastillas, Cloro libre, Clorador de recámara seca, Clorador de recámara húmeda, Hipoclorito de calcio, Ácido tricloroisocianúrico-

ABSTRACT

Small-scale disinfection of drinking water in Costa Rica presents great challenges because, in most cases, it is carried out empirically by the personnel in charge. In this project, the tablet chlorination system of ASADA Cooperosales, Cartago, was evaluated and modified. In addition, a liquid chlorine chlorination system controlled by an oxidation-reduction potential (ORP) sensor located in a shopping center in San José was evaluated. At ASADA, four different chlorinators were used to test their effectiveness, these were a dry chamber artisan chlorinator with design problems, a commercial dry chamber Accu-Tab brand chlorinator, then it was tested with the same dry chamber artisanal chlorinator with the addition of a flow meter and jet taps and, finally, an artisanal humid chamber chlorinator. Also, at ASADA a premix tank was implemented to carry out the chlorination prior to the storage tanks. The effectiveness of the changes to the ASADA and the automated system in the mall was verified by monitoring free chlorine. At the ASADA, a significant improvement was observed when implementing the premix tank, however, the free chlorine readings at the outlet of the storage tanks showed great variation in chlorine levels throughout the day, being difficult to comply with the legislation. In the ORP-controlled system the chlorine level was in accordance with the legislation for a longer time. In the case of chlorination by tablets, it is recommended to evaluate its automation by controlling the flow rate of entry to the chlorinators, for example with ORP. In the use of ORP technologies, it is recommended to complement with pH measurement and regulation, in addition to giving them constant maintenance and cleaning. In addition, due to the pandemic caused by the COVID-19 disease, standard No. 38924-S expanded the upper limit of free chlorine, resulting in a range that goes from 0.3 mg/L to 1.0 mg/L, achieving increase in the percentages of compliance with the standard in residual free chlorine for the measurements that were carried out in most of the systems analyzed. Therefore, it is advisable to evaluate maintaining the norm in this range.

Key words: Drinking water, small systems, ASADAS, Disinfection, ORP, Chlorination pills, Free chlorine, Chlorinator dry chamber, Chlorinator moist chamber, Calcium hypochlorite, Trichloroisocyanuric acid

1 INTRODUCCIÓN

Alrededor de dos mil millones de personas en el mundo ingieren agua contaminada por excretas, esto trae medio millón de muertes al año por diarrea, principalmente en países en vías de desarrollo (Pichel, Vivar, & Fuentes, 2019). Mediante la desinfección se puede reducir dicho problema ya que elimina agentes patógenos (como bacterias y esporas, virus, protozoos y quistes, gusanos y larvas) para que los humanos la utilicen de forma segura (Srivastav, Patel, & Chaudhary, 2020), evitando brotes de enfermedades como el cólera, tifoidea y disentería amebiana (Demarini, 2020).

Los desinfectantes que se emplean comúnmente son el cloro, dióxido de cloro, ozono, cloraminas, radiación UV y peróxido de hidrógeno (Turner, 2019), no obstante, el cloro es el más utilizado a nivel mundial, por su bajo costo, efectividad y simple operación (Kujlu, Mahdavianpour, & Ghanbari, 2020; Pichel et al., 2019; Srivastav et al., 2020).

El cloro presenta desventajas como el olor y sabor que aportan al agua y la formación de subproductos de desinfección (SPD) halogenados al reaccionar con materia orgánica, bromuros, yoduros y contaminantes antropogénicos (Demarini, 2020; Schneider & Bláha, 2020). Estudios toxicológicos apuntan a una posible genotoxicidad, citotoxicidad, carcinogenicidad, teratogenicidad y trastornos endocrinos asociados a la exposición de los SPD (Cortés & Marcos, 2018; Dong, Massalha, Plewa, & Nguyen, 2017).

A pesar de los problemas y amenazas a la salud, el no clorar el agua puede tener mayores riesgos, que los asociados a los SPD (Betcher, 2004), por lo que es de suma importancia, realizar la desinfección de manera correcta y apegado a la legislación. Según lo estipulado en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto N° 38 924-S), que está bajo la rectoría del Ministerio de Salud, donde se estipula un rango de cloro libre comprendido entre los 0,30 - 0,60 mg/L.

En Costa Rica los desinfectantes más comunes son el cloro gas, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio (granulado o en tabletas), pero los recomendados son el gas cloro para plantas que abastecen a una gran población y el hipoclorito de calcio (en tableta) para acueductos rurales con pequeñas poblaciones (Mora-Castro, 2011). Sin embargo, el cloro gaseoso es peligroso para la salud en caso de fugas, además de su dificultad y costo económico para transportarlo, por su parte, el hipoclorito de calcio si es almacenado en malas condiciones podría provocar incendios (José & Rebelo, 2017; White, 2010).

El objetivo de este trabajo fue evaluar dos sistemas de desinfección diferentes, uno basado en un clorador con pastillas y controlado manualmente y otro que utiliza hipoclorito de sodio líquido controlado con un sensor de oxidación reducción (ORP)- El primer sistema de desinfección, se evaluó en la ASADA Cooperosales, donde se probaron tres sistemas de cloración utilizando tabletas (de hipoclorito de calcio y ácido tricloroisocianúrico), para sustituir al clorador artesanal con el que contaban, ya que no era efectivo. El segundo sistema, se evaluó en un centro comercial donde se implementó un sistema de desinfección automatizado, que consistió en un sensor ORP, una bomba dosificadora de hipoclorito de sodio y un panel de control, para garantizar la concentración de cloro apropiada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general:

Evaluar la aplicación de dos tecnologías de cloración como método de desinfección de agua para consumo humano.

1.1.2 Objetivos específicos

- Mejorar el sistema de cloración llamado “de cámara seca o con pastilla”.
- Automatizar la aplicación el cloro mediante una bomba dosificadora de hipoclorito de sodio, controlado mediante un sensor ORP.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 SITUACIÓN DEL AGUA POTABLE

2.1.1 Situación a nivel mundial

Según Kroehler (2014), en países desarrollados, el agua es segura, abundante y barata, por lo que el 97% de agua para consumo humano, se usa en inodoros, jardines y lavados, pero en países subdesarrollados, casi mil millones de personas carecen de agua de calidad. Pichel et al. (2019) sostienen que actualmente 2 000 millones de personas en el mundo tienen acceso a agua potable contaminada con materia fecal y unos 2 300 millones de personas carecen de instalaciones de saneamiento mejoradas.

Rudra (2011) estima que en 1995, 436 millones de personas en 29 países, sufrieron escases de agua, pero al 2025 el dato podría aumentar a 1 400 millones de personas en 48 países, además, el 20% de la población mundial no tiene acceso a agua limpia y potable. Al consumir agua contaminada, se corre el peligro de contraer alguna enfermedad, al año se registran aproximadamente 842 000 muertes por diarrea, de las cuales 361 000 corresponden a niños menores de 5 años (World Health Organization, 2019).

En cuanto a regulación internacional, la WHO, estableció un mínimo de cloro libre de 0,5 mg/L para desinfección primaria, tiempo de contacto de 30 minutos, pH<8, turbidez inferior a 1 NTU y en el punto de entrega al usuario, el mínimo de cloro libre debe ser de 0,2 mg/L y máximo de 5,0 mg/L (World Health Organization, 2017). Para efectuar la cloración, la turbidez debe presentar un valor menor a 5 NTU y un valor medio de menos de 1 NTU (World Health Organization, 1997). No obstante, la cloración puede generar subproductos de desinfección (SPD) como los trihalometanos que han sido relacionados con varios tipos de cáncer (Amjad et al., 2013). Entre los SPD se pueden mencionar el bromato, bromodiclorometano, bromoformo, clorato, clorita, cloroformo, dibromoacetoneitrilo, dibromoclorometano, dicloroacetato y dicloroacetoneitrilo, entre otros (World Health Organization, 2017).

2.1.2 Situación nacional

En Costa Rica la demanda de agua potable por parte de la población, se estima en 0,54 km³/año, que se obtienen en un 63% de nacientes, 23% de pozos y un 10% de quebradas (Bolaños-Alfaro, 2013). El agua subterránea es la principal fuente de suministro, debido a la amenaza que representan para la salud las aguas superficiales, ya que estas se exponen aguas residuales no tratadas, sedimentos y productos químicos agrícolas (Bower, 2014).

Según el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (2018), para el año 2016, en el país 4 833 752 personas tuvieron acceso al agua potable, que fue suministrado por diferentes entes (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Entes administradores de agua potable y su distribución porcentual de abastecimiento para el 2016 (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2018)

Ente operador	Población cubierta	
	Absoluta	Porcentaje
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA)	2 259 194	46,7
Las Asociaciones administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados (ASADAS)	1 406 495	29,1
Municipalidades	674 570	14,0
Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH)	225 695	4,7
Otras formas de abastecimiento	267 798	5,5
Total población	4 833 752	100,0

De la población total, el 81,0% tiene agua potable, este porcentaje es menor en las zonas rurales con un 60,0%, el AyA indica que de lo abastecido el 86,3% cuenta con tratamiento y desinfección; cerca de 426 681 personas no reciben agua potable (8,8% de la población total) son abastecidas por 736 acueductos (89,9% administrados por Acueductos Comunales) (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2018).

En un estudio en Costa Rica, con una muestra de 1 342 entes operadores se encontró que el 63,1% de estos, tiene un clorador, el 9,5% tiene dos cloradores, el 3,9% tiene tres o más cloradores, el 23,2% no realiza cloración y el 0,4% desconoce u omite el dato (Arellano-Hartig et al., 2019). En gran medida por la falta de capacitación de los funcionarios en acueductos rurales, lo que dificulta el uso adecuado de las tecnologías, aunque estas no tengan un alto grado de complejidad (Mora-Castro, 2011).

En cuanto a legislación nacional, el “Reglamento para la Calidad del Agua Potable” bajo el Decreto Ejecutivo N° 38 924-S del 2015, es el que vela por la calidad del agua que abastece a la población. En este reglamento se subdivide el control de la calidad del agua en cuatro niveles, el primero (N1) se le debe aplicar a todo ente administrador del recurso y es el que regula parte del proceso de desinfección (Ministerio de Salud, 2020). De los parámetros de N1, Cuadro 2.2, el más importante es el cloro libre residual, así como la turbiedad, temperatura y pH, que son factores determinantes en la concentración del cloro libre y su efectividad en el proceso de desinfección. Además del *Escherichia coli* y coliformes fecales, que son un indicador de la correcta desinfección.

Cuadro 2.2 Parámetros relacionados con la desinfección del agua (Ministerio de Salud, 2020)

Parámetro	Unidad	Valor alerta (VA)	Valor máximo admisible (VMA)
Primer nivel			
Coliforme fecal	NMP/100 mL o UFC/100 mL	Ausente	Ausente
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 mL o UFC/100 mL	Ausente	Ausente
Color aparente	U-Pt-Co	5	15
Turbiedad	NTU	<1	5
Temperatura	°C	18	30
pH	Valor pH	6,5	8,5
Cloro residual libre	mg/L	0,3	0,6

2.2 GENERALIDADES DE LA DESINFECCIÓN

2.2.1 Tipos de desinfección

La desinfección del agua busca la destrucción parcial o inactivación de microorganismos patógenos para evitar brotes de enfermedades transmitidas por el consumo de agua contaminada. Entre estas se pueden destacar la giardiasis, la amebiasis, la ascariasis, el cólera y otras (Chernicharo, 2017; Kabir, Ma, Renn, Nicholas, & Cheng, 2019). Algunos de los métodos de desinfección utilizados en agua se muestran en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3 Diferentes métodos de desinfección aplicados a agua potable

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Fuente
Aplicación de calor	Llevar la temperatura del agua a ebullición en un tiempo de 20-30 minutos	Destrucción de los microorganismos pertinentes	Se limita a emergencias; funciona para flujos pequeños Implica un alto consumo energético	Faust & Aly, 1998
Irradiación de luz UV	Exposición de una película delgada de agua, de 120 mm de espesor con lámparas de arco de vapor de mercurio de cuarzo que emiten radiación en el rango de 240 a 295 nm. Aspectos operativos: Longitud de onda de 253,7 nm, velocidad de flujo de 750 gal/hr, tiempo de contacto de 4,2 segundos y una profundidad de flujo de 3/8 pulg	Se evita el tratamiento químico, cortos tiempos de contacto, muy efectivo para la destrucción de organismos coliformes y no produce sabor ni olor; no tiene afectación por temperatura, pH y la presencia de materia orgánica puede proteger microorganismos, pero no afecta los rayos UV	No es efectivo contra esporas, quistes y virus, requiere pretratamiento para eliminar la turbidez, no tiene efecto residual, los costos de energía eléctrica pueden ser altos y se limita a los suministros de agua a pequeña escala	Faust & Aly, 1998 José & Rebelo, 2017
Iones de metal	Algunos iones de metal como Cu^{2+} , Ag^+ y Hg_2^{2+} tienen capacidad bactericida. Su efectividad se observa en concentraciones "bajas". La plata ha sido estudiada ampliamente para este fin, también se conoce de las propiedades alguicidas del cobre	Concentraciones bajas de desinfectante y actividad bactericida residual prolongada	Requiere pretratamiento para eliminar turbidez y color orgánico. Quistes y esporas son resistentes; a bajas temperaturas disminuyen la actividad germicida; se requieren largos tiempos de contacto; y es costoso. Se recomienda para aplicaciones de emergencia y a pequeña escala con plata.	Faust & Aly, 1998
Bromo	El bromo (Br_2) es un halógeno líquido a presión atmosférica y 3,2 veces más pesado que el agua, en algunos casos se utiliza en piscinas. Es el único no metal líquido a temperatura ambiente; no se utiliza para potabilizar agua, debido a los peligros de su manejo y su difícil medición en forma molecular	El bromo es fácilmente detectable en agua; el bromo (Br_2) y la monobromamina (NH_2Br), tienen capacidades iguales a las del cloro a valores de pH similares	Se recomienda solo en casos de emergencia para potabilizar agua; tiene un fuerte sabor medicinal; extremadamente corrosivo para la mayoría de metales	Faust & Aly, 1998 Black & Veatch Corporation, 2010

Continuación del Cuadro 2.3

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Fuente
Iodo	En algunos casos se utiliza en piscinas; también ha sido utilizado en la desinfección de agua en campamentos militares durante la I y II Guerra Mundial	Excelente para potabilizar agua; la Globaline (hidroperóxido de tetraglicina) es eficaz para la desinfección de bacterias entéricas, quistes amebianos y cercarias de esquistosoma con una o dos tabletas por cuarto y un período de contacto de 10 minutos; no reacciona con compuestos nitrogenados por lo que el sabor en aguas contaminadas será diferente	Se recomienda solo en casos de emergencia para potabilizar agua; tiene un sabor percibible; el poder bactericida y viricida del cloro es superior al presentado por las especies de iodo (cuatro veces más cisticidas que HIO, 200 veces más viricida y dos veces más cisticidas que el I ₂); la yodación debe ser más investigada porque podría causar efectos fisiológicos indeseados; tiene costos más altos comparados frente a la cloración	Faust & Aly, 1998 Black & Veatch Corporation, 2010
Ozono	El ozono es uno de los oxidantes y desinfectantes más fuertes utilizados en el tratamiento de aguas y aguas residuales. Puede ser clasificado como un compuesto oxidante y germicida	Es efectivo en la destrucción de las bacterias tifoideas y del cólera; el único SPD regulado por ozono es el bromato, que se da por la reacción del bromuro y el ozono. El ozono reacciona rápidamente para oxidar iones como el bromuro, clorito, cianuro, hierro (II), manganeso (II y IV), nitrito y sulfuro; efectivo para eliminar los compuestos que causan sabor y olor, combinado con cloro, oxida los compuestos que demandan cloro, por lo que disminuye la dosis de cloro; reduce los SPD; efectivo contra virus y bacterias; degrada gran cantidad de pesticidas y otros químicos orgánicos	Los costos energéticos son extremadamente altos, su inestabilidad en agua y no tiene efecto residual; el gas puede explotar por catalizadores traza, materiales orgánicos, descargas o chispas eléctricas y cambios repentinos de temperatura o presión; la descomposición del ozono disuelto se acelera a altas temperaturas, pH o concentraciones de COT; no tienen un efecto residual o duradero	Faust & Aly, 1998 Black & Veatch Corporation, 2010 José & Rebelo, 2017
Cloro	Es posible encontrarlo en varias formas como gas, dióxido de cloro, cloraminas, isocianurato clorado e hipoclorito de calcio. El cloro gaseoso puede ser comprimido y almacenado en contenedores cilíndricos. Al estar en forma líquida o gaseosa, reacciona con pocos metales a temperaturas ordinarias.	Tiene un efecto residual en el agua que evita el crecimiento de nuevos microorganismos o el efecto por una contaminación en la red de distribución; es efectivo oxidando compuestos como sulfuro de hidrógeno, manganeso (II), hierro (II), sulfito, bromuro, yoduro y nitrito, entre otros, pero estos aumentan el consumo de cloro y en agua con amonio, el cloro libre se combina rápidamente con amonio para formar cloraminas; los cloroisocianuratos clorados se disocian rápidamente en agua llegando a un equilibrio en el que si el ácido hipocloroso se consume al reaccionar con materia orgánica, estos se disociarán rápidamente para liberar más ácido hipocloroso	En caso de fuga del gas cloro y al aspirarse puede causar edema pulmonar; el hipoclorito en una solución concentrada es una sustancia altamente corrosiva y las salpicaduras pueden causar quemaduras y dañar los ojos; el cloro húmedo corroe la mayoría de los metales rápidamente; el deterioro de las soluciones de hipoclorito puede ser rápido y se acelera por la luz, el calor y la ventilación; su efectividad se ve influenciada por el pH, la turbidez, la presencia de amoníaco y la demanda de oxidantes; no todos los derivados del cloro han sido utilizados para la desinfección de agua potable y algunos tipos son más económicos que otros.	José & Rebelo, 2017

La desinfección se puede llevar a cabo por medio de procesos físicos o productos químicos, donde el cloro y el ozono son los más comunes, pero la selección de algún método depende de las necesidades y condiciones que presente el agua que se desea someter a desinfección, procurando siempre su efectividad y sostenibilidad a lo largo del tiempo.

2.2.2 Desinfección con cloro

El uso de cloro es común, por su eficacia, bajo costo, facilidad de uso, su efecto residual y que se puede aplicar de diferentes maneras, como gas-cloro, dióxido de cloro, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, (Daniel, 2001; Metcalf & Eddy, 2013) y ácido tricloroisocianúrico, cada uno con sus propiedades (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4 Propiedades registradas para el cloro (Arboleda-Valencia, 2000; Cheremisinoff, 2002)

Símbolo o fórmula	Cl ₂	ClO ₂	NaOCl	Ca(OCl) ₂	Cl ₃ (NCO) ₃
Peso molecular	70,90	70,90	74,45	142,99	232,40
Estado	Gas	Líquido	Líquido	Sólido	Sólido
Color	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo	Blanco cristalino
Punto de congelación		-100,98			
Punto de licuefacción (ebullición)	-34,5°C (1 at)	-35,5°C (1 at)			
Cloro disponible	98,8%	98,8%	12-15%	70%	90%
Forma de empaque		Cilindros de 100, 150 y 2 000 lb	Barriles	Barriles, sacos	Barriles plásticos de 25 o 50 kg
Materiales que resisten el ataque	Seco: Hierro negro, cobre y acero. Húmedo: Vidrio, plata, caucho.	Seco: Hierro negro, cobre y acero. Húmedo: PVC, teflón, polietileno.	Cerámica, vidrio, plástico o caucho.	Cerámica, vidrio, plástico o caucho.	Cerámica, vidrio, plástico o caucho.

La principal propiedad desinfectante del cloro radica en a su fuerte propiedad oxidante (Huangfu, Zhang, Jang, & Feng, 2019). Chaves, Guerreiro, Cardoso, Benoliel, &

Santos (2019), confirman que los productos hechos a base de cloro se utilizan con mayor frecuencia a nivel mundial y a veces se combinan con otros métodos de desinfección.

La importancia de la permanencia del cloro residual, está en prevención de una posible contaminación o proliferación de gérmenes a lo largo de la red de distribución (Huangfu *et al.*, 2019).

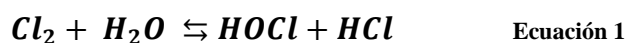
El cloro es eficaz a niveles muy bajos de turbidez y sólidos suspendidos totales, ya que en altos niveles actúan como refugio para microorganismos, afectando la eficacia del desinfectante al disminuir el contacto con el desinfectante (Quartaroli, Cardoso, Ribeiro, & Ribeiro-da-Silva, 2018). En efecto, la desinfección alcanza una eficiencia máxima cuando el agua tiene una turbiedad cercana a la unidad (Vargas, Barrenechea-Martel, Aurazo-Zumaeta, & Maldonado-Yactayo, 2004).

La utilización del cloro puede acarrear problemas al formar SPD. Su formación depende de la dosis de desinfectante, temperatura, pH, tiempo de contacto, agente coagulante, también las condiciones climáticas, características propias de la red de distribución (Plewa, Wagner, & Richardson, 2017), cantidad y tipo de materia orgánica natural (MON) con la que reacciona el cloro (Han & Zhang, 2018; Pan & Zhang, 2013; Yang & Zhang, 2016). El agua con pH básico, propicia la formación de trihalometanos (THM) y la disminución de los ácidos haloacéticos (AHA), haloacetamida y halocetonas, lo contrario en condiciones ácidas, al aumentar la formación de AHA (Cortés & Marcos, 2018).

2.2.3 Variables de control en sistemas de cloración

2.2.3.1 Propiedades químicas del cloro

El cloro al entrar en contacto con el agua, sufre hidrólisis (Wang & Margerum, 1994) (Ecuación 1).



El pH juega un papel decisivo en la disociación del ácido hipocloroso, ya que este puede estar presente en el agua junto al ion hidronio y el ion hipoclorito durante el proceso (Ecuación 2).



El cloro se puede presentar de varias maneras en el agua, tales como cloro libre disuelto, ácido hipocloroso o como ión hipoclorito, especies que se conocen como cloro libre activo (Pradana-Pérez & García-Avilés, 2019). El ácido hipocloroso es una especie débil por lo que se disocia pobremente a $\text{pH} < 6$ (Faust & Aly, 1998).

Por lo que al agregar cloro al agua, formará HOCl u OCl^- de manera inmediata; el pH es importante en la formación de las especies porque el HOCl y OCl^- tienen diferentes capacidades de desinfección, ya que el HOCl tiene mayor poder bactericida y oxidante frente al OCl^- (Faust & Aly, 1998), pues el HOCl es de 80 a 300 veces más efectivo que OCl^- (Steininger, 1985) (Cuadro 2.5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Cuadro 2.5 Semirreacciones de potencial estándar para especies formadas por el cloro (White, 2010)

Semirreacción	E^0 (V)
$\text{HOCl} + \text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	+1,482
$\text{OCl}^- + \text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	+0,81

Generalmente, el 50% del cloro presente en el agua a un pH de 7,3 estará en forma de HOCl y el 50% restante estará presente como OCl^- (Pizzi, 2011) (Figura 2.1). Amoedo-Cabaleiro (2005), indica que para un pH entre 5 y 6, el cloro está presente como HOCl y por encima de pH 9 predomina el OCl^- . Por lo tanto, entre más alto sea el valor del pH , se dará un incremento en la concentración del OCl^- , lo que se traduce en una reducción en la capacidad de desinfección (Pizzi, 2011).

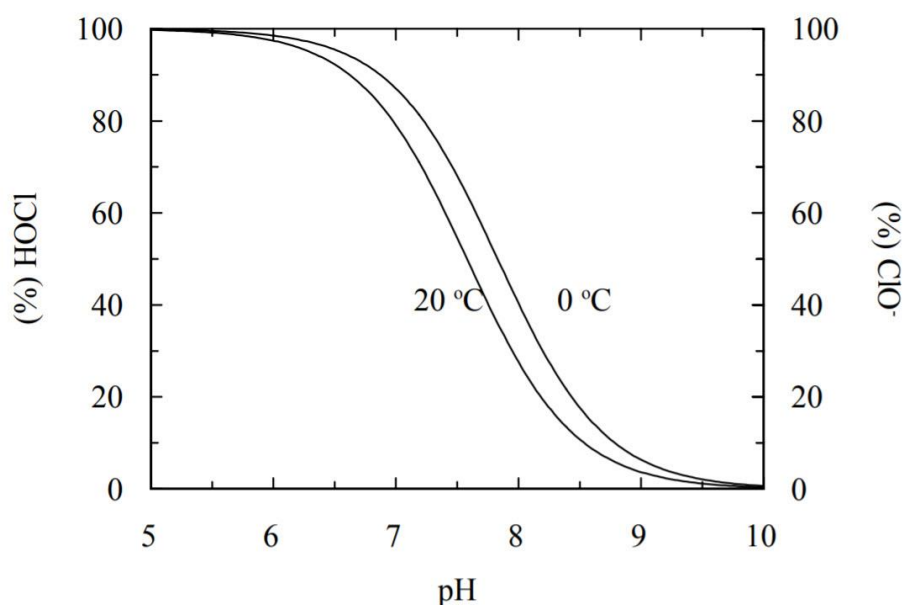


Figura 2.1 Porcentaje de variación entre el ácido hipocloroso e ion hipoclorito con el pH a diferentes temperaturas (Amoedo-Cabaleiro, 2005; Faust & Aly, 1998)

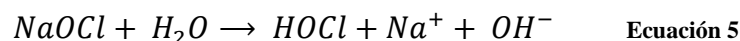
Se pueden usar pastillas de hipoclorito de calcio (Ca(OCl)_2) para la desinfección, estas al entrar en contacto con el agua, sufre un proceso de hidrólisis (Ecuación 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



El ácido tricloroisocianúrico ($\text{Cl}_3(\text{NCO})_3$), también conocido como tricloro, hidroliza para generar cloro libre (Ecuación 4); **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



El hipoclorito de sodio, disuelto en el agua, también hidroliza al estar en contacto con el agua (Ecuación 5)



2.2.3.2 Tiempo de contacto

Cuanto mayor es el tiempo de contacto, mayor será la posibilidad de destrucción de los microorganismos para una cierta dosis de cloro aplicado (Vargas et al., 2004). Según Ritter (2010) el tiempo de contacto se puede reducir, al tener dosis altas de desinfectante, lo que brindaría el mismo efecto que ejercen bajas concentraciones con largos tiempos de contacto. El Cuadro 2.6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, exhibe el producto de la variación del tiempo de contacto, para la inactivación de virus y protozoarios a distintos pH y temperaturas, siendo los mejores tratamientos en pH comprendido entre 7,0 y 7,5 con las mayores temperaturas, lo que hace sentido con lo estipulado en la legislación nacional, que se fijó para un valor de pH entre 6,0 y 8,0 y una temperatura entre 18°C y 30°C (Ministerio de Salud, 2020).

Cuadro 2.6 Tiempo de contacto (en minutos) para inactivación de microorganismos patógenos (Vargas et al., 2004)

pH	Virus			Protozoarios		
	0-5 °C	10 °C	5 °C	15 °C	25 °C	
6,0	-	-	80	25	15	
7,0	-	-	100	-	35	
7,0-7,5	12	8	-	-	-	

7,5-8,0	20	15	-	-	-
8,0	-	-	150	50	15
8,0-8,5	30	20	-	-	-
8,5-9,0	35	22	-	-	-

2.2.3.3 Dosis óptima y demanda de cloro

Para determinar la dosis de cloro se debe conocer el punto de quiebre del agua que se desea clorar y así aplicar la cantidad de cloro necesaria para obtener la concentración de cloro residual requerida, que permita cumplir con lo estipulado por la legislación competente.

Comúnmente para tratar agua potable el cloro se oxida con agentes químicos orgánicos o inorgánicos (como amoníaco, sulfuros, hierro ferroso, ión manganeso, material húmico), biopelículas en la pared de la tubería o por procesos de corrosión (Clark, 1998). El cloro al oxidar un contaminante, gana electrones y se reduce a cloruro, por otra parte el contaminante pierde electrones y se oxida (White, 2010).

Para obtener una dosis de *cloro libre*, se debe cuantificar cuanto del cloro aplicado (*dosis de cloro*) fue consumido por los agentes reductores, a lo que se llama *demanda de cloro* (Shamrukh & Abdel-Lah, 2006) (Ecuación 6).

$$\text{Cloro libre} = \text{Dosis de cloro} - \text{Demanda de cloro} \quad \text{Ecuación 6}$$

En presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua, se debe agregar suficiente cloro para oxidar estos compuestos antes de que se pueda producir un residuo libre, esto se denomina punto de ruptura de la cloración, que representa el trazado de la dosis de cloro aplicada frente al cloro residual (Shamrukh & Abdel-Lah, 2006).



Figura 2.2 Curva de punto de quiebre para el cloro (Modificada de Ritter (2010))

La Figura 2.2 muestra una curva de demanda de cloro, que se divide en tres etapas interpretadas por Ritter (2010), como la primera (del punto 1 al 2) donde el cloro oxida especies químicas reducidas presentes en el agua cruda, seguido de la formación de compuestos, mayormente cloraminas (del punto 2 al 3) y una tercera etapa (del punto 3 al 4), en la que se destruyen parcialmente las cloraminas y compuestos formados en la etapa anterior, llegando así al punto 4, conocido como punto de quiebre. Todo el cloro agregado después del punto 4, se convertirá en cloro libre.

2.3 MÉTODOS DE CLORACIÓN

2.3.1 Uso de cloro líquido

Comúnmente el cloro se aplica como gas o hipoclorito de sodio (líquido) para la desinfección de agua potable (Betcher, 2004). En países desarrollados la mayoría de instalaciones desinfectan el agua con gas cloro (Clasen & Edmondson, 2006). Solo en la

Unión Europea, el uso del hipoclorito de sodio (NaOCl) oscila en el rango de 1 000 000 a 10 000 000 de toneladas por año (Romanovski, Claesson, & Hedberg, 2020).

El hipoclorito de sodio y gas cloro, comparado contra formas de cloro seco (como las tabletas), su almacenamiento y transporte son más costosos (White, 2010), aunque el hipoclorito de sodio se puede producir en zonas alejadas con generadores a un costo relativamente bajo, mediante electrólisis (Clasen & Edmondson, 2006), es decir, aplicación de electricidad ($2e^-$) (Ecuación 7).



El NaOCl no puede existir sin agua, si se intentara evaporar, se descompondría en clorato de sodio, cloruro de sodio y vapor de agua (White, 2010). Además el NaOCl presenta un problema muy importante, con la descomposición lenta al pasar de los días y semanas en condiciones ambientales (principalmente altas temperaturas), formando cloruro de sodio, clorato de sodio, oxígeno y otros SPD indeseados, disminuyendo el cloro disponible y su efectividad (Stefán, Erdélyi, Izsák, Záray, & Vargha, 2019; White, 2010). Incluso en un frasco opaco y cerrado correctamente, el NaOCl, tiene una vida útil de 6 meses, después ser abierto (Clasen & Edmondson, 2006).

De todos los hipocloritos disponibles en el mercado, el hipoclorito de sodio, es uno de los más utilizados en campos como en la industria para aplicaciones de agua domésticas, industriales y comerciales (Mohammed, 2019). El hipoclorito de sodio se consume en gran medida como blanqueador doméstico, debido a su accesibilidad, lo que lo hace de su uso potencialmente sostenible, tanto en hogares como sistemas de tratamiento (Clasen & Edmondson, 2006), este es un agente oxidante fuerte de nivel biocida, de acción baja o intermedia, dependiendo de su dosificación, además de ser barato (Köhler et al., 2018).

2.3.2 Uso de cloro sólido

El cloro puede aplicarse en forma sólida utilizando hipoclorito de calcio y ácido tricloroisocianúrico. En general se puede aplicar usando cloradores de cámara seca y de cámara húmeda.

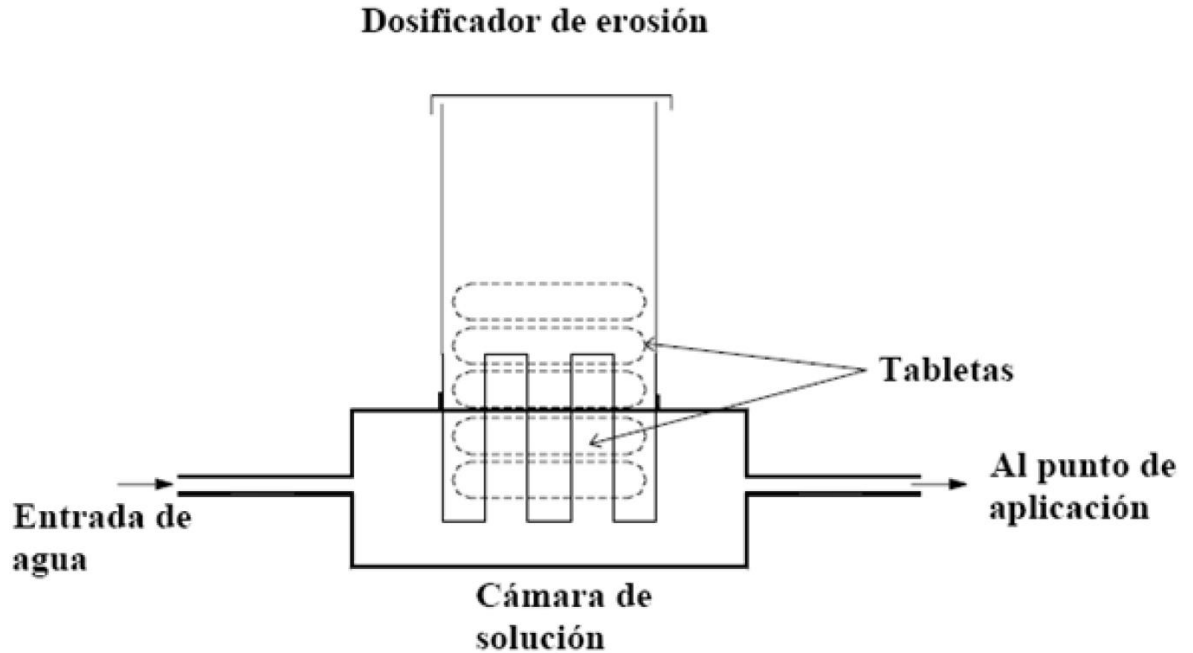


Figura 2.3 Clorador de cámara seca (Mora-Castro, 2011)

Las tabletas de hipoclorito de calcio son utilizadas en cloradores de cámara seca (Figura 2.3), donde la entrada y salida del agua están casi al mismo nivel, haciendo que solo se humedezca la tableta que tiene contacto con el agua. Este sistema, desgasta las tabletas en la parte inferior, dejando secas las de arriba (conforme se gastan, se reponen por gravedad), no funcionan con alta presión, porque inundaría la recámara, se mojarían completamente y las desintegraría, la dosis depende del caudal de cloración (Mora-Castro, 2011). La marca de hipoclorito de calcio más familiar es la Accu-Tab, de la compañía norteamericana PPG Industries, Inc, que también ofrecen equipos de cloración (Betcher, 2004).

El hipoclorito de calcio tiene un menor costo respecto a otros desinfectantes, es preciso, confiable y requiere bajo mantenimiento, por lo que es ideal para instalaciones de muchos tamaños (Betcher, 2004). Los equipos empleados son más simples comparados con el gas cloro (Pichel et al., 2019), haciendo posible implementarse en lugares donde no hay energía o su suministro es intermitente (Gray, 2008). Asimismo, el hipoclorito de calcio contiene aproximadamente un 65% de cloro disponible, contra un 12-15% del hipoclorito de sodio en concentraciones industriales, lo que implica que de 10 libras de hipoclorito de calcio, se obtienen 6,5 libras de cloro (Spellman, 2020).

El hipoclorito de calcio seco es peligroso de almacenar y manipular, ya que los golpes, el calor y la fricción podrían hacerlo explotar y generar incendios, además absorbe humedad ambiental, que ocasiona una descomposición (menor a la del NaOCl), reduciendo el cloro disponible a una tasa del 3% al 5% anual en condiciones normales (White, 2010), por lo que es necesario almacenarlo en recipientes herméticos en lugares frescos, secos y oscuros (Spellman, 2020).

Otra alternativa para desinfectar el agua potable, que es poco conocida, es el ácido tricloroisocianúrico, porque se utiliza principalmente para agua de piscinas (Pinto & Rohrig, 2003). En este caso la tableta se encuentra completamente sumergida en la recámara del clorador, por eso es llamado clorador de cámara húmeda (Figura 2.4).

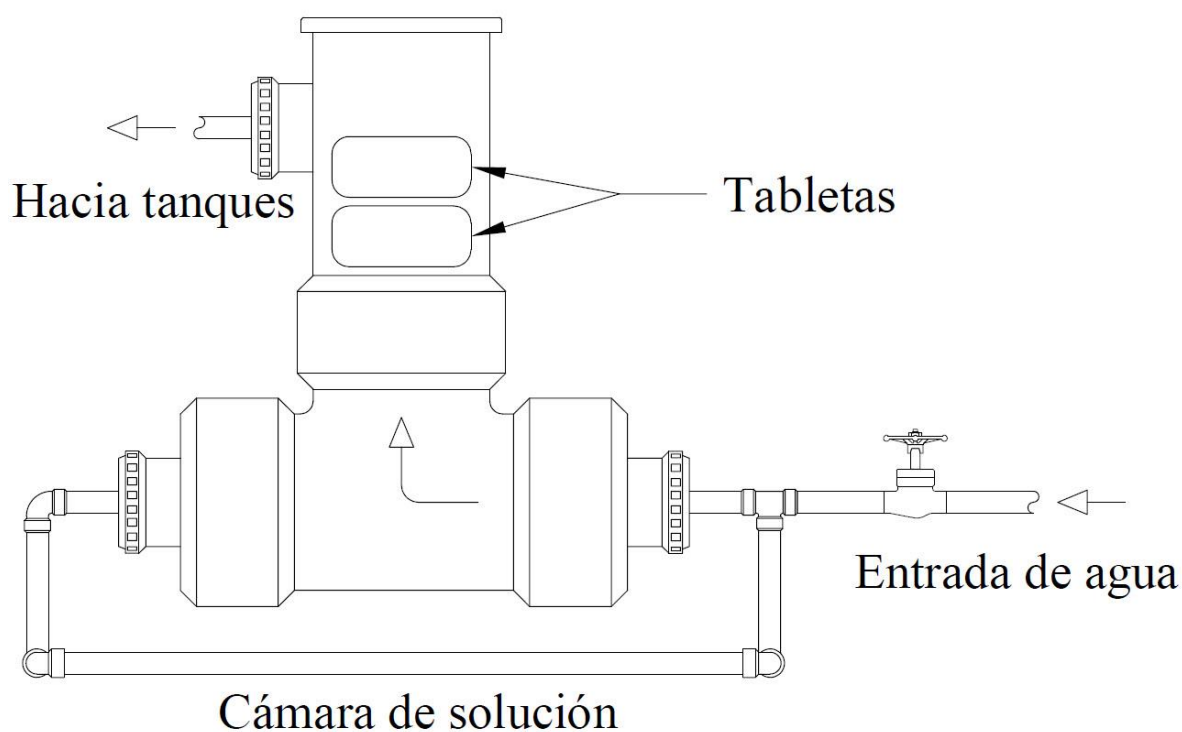


Figura 2.4 Clorador de cámara húmeda

El clorador de cámara húmeda (Figura 2.4) cuenta con una llave de chorro que junto al flujómetro, permiten la regulación de agua cruda, esta atravesará la cámara de solución subiendo hasta la salida, lo que obliga al contacto entre el agua cruda y las tabletas. El ACL 90, marca comercial de OxyChem (de EEUU), de ácido tricloroisocianúrico, cuenta con certificaciones por parte de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por su sigla en inglés) para uso rutinario en agua potable y la National Sanitation Foundation (NSF) International bajo

el estándar 60 (González-Vargas, 2011). Desde la fabricación de este compuesto a gran escala, ha desplazado a agentes como el hipoclorito de calcio, tiene la ventaja de un mayor grado de cloro activo, un 91,5% (Tilstam & Weinmann, 2002). Las tabletas ACL 90 son de lenta disolución y alta estabilidad en solución acuosa, porque no se degrada a cloro gas por exposición a la luz ultravioleta, las variaciones de pH, por concentración y temperatura (González-Vargas, 2011).

El ácido cianúrico ($C_3H_3N_3O_3$) es confundido con el cianuro, pero no están relacionados químicamente, la EPA ha realizado análisis en apoyo a su registro, descubriendo que los isocianuratos clorados no son más que ligeramente tóxicos y no corrosivos, tampoco presentan toxicidad crónica o subcrónica, no es fetotóxico, teratogénico, mutagénico o cancerígeno, no se metabolizan en el cuerpo y no se bioacumulan (Clasen & Edmondson, 2006).

Además, el ácido cianúrico es un estabilizador y evita la transformación de ácido hipocloroso en ion hipoclorito, debido a la luz solar o al calor (Patil, Ahmad, Balkundae, Kausley, & Malhotra, 2020). Tienen a su favor un alto porcentaje de cloro disponible y en forma sólida son más simples de manejar (comparado con el cloro líquido o gaseoso), son estables al almacenarse, incluso por años y no agregan calcio al agua (Wahman & Alexander, 2019).

2.4 MEDICIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE CLORO

2.4.1 Métodos químicos

Según Sawyer, McCarty, & Parkin (2003), las técnicas para medir cloro pueden clasificarse en métodos para el cloro total y métodos para las formas libres y combinadas, algunos métodos son el de la ortotolidina, yodométrico, valoración amperométrica y DPD.

A pesar de la gran variedad de métodos existentes para la medición del cloro en sus diferentes formas (libre o combinado), en Costa Rica, el que se utiliza en gran medida, es el DPD, ya que es el que mejor se adapta a las condiciones, tanto económicas, como operativas, al permitir mediciones en campo.

Este método se basa en la reacción redox del cloro libre con el reactivo DPD (*N, N'*-dietil-*p*-fenilendiamina), el cual genera un cambio de color en la muestra en un color de intermedio rojo y la absorbancia se puede medir a 515 nm (Huangfu et al., 2019). El DPD con yoduro de potasio, permite determinar el cloro total en una muestra, generando un color rojo más fuerte, que se puede cuantificar por el método colorimétrico o por titulación con ión ferroso (hasta desaparecer el color rojo, que también aplica para cloro libre) (Sawyer et al., 2003).

De esta forma es posible determinar el cloro combinado, haciendo una diferencia entre el cloro total y el cloro libre, además, que la legislación nacional solo pide cuantificar el cloro libre, como lo muestra el Cuadro 2.2.

La desventaja que presentan los kit de DPD es que no distinguen entre las formas de cloro libre (ión hipoclorito y ácido hipocloroso), en consecuencia, si el pH sube, el HOCl podría disminuir casi a cero y el kit de DPD seguiría mostrando el mismo nivel de cloro libre (Steininger, 1985), afectando el proceso de desinfección.

2.4.2 Métodos basados en potencial oxido reducción (ORP)

Existe preocupación por la contaminación del agua, por lo que se han implementado sistemas en línea multiparámetros que permiten la detección en tiempo real y la toma de acciones correctivas, uno de ellos es el potencial de oxidación-reducción (ORP) (Capodaglio & Callegari, 2009; Kavi-Priya, Shenbagalakshmi, & Revathi, 2020). El ORP mide la propiedades oxidantes del desinfectante y disponibilidad de electrones libres en el agua, se determina mediante un sensor con electrodo metálico, generalmente platino y un electrodo de referencia estándar (Steininger, 1985). El uso del platino en los sensores ORP sobresale debido a su alta densidad de intercambio de corriente y las mediciones de estos se expresan en las unidades de milivoltios (mV) (James, Copeland, & Lytle, 2004).

El ORP de un potencial de una semirreacción se describe mediante la ecuación de Nernst (Ecuación 8).

$$E_h = E_h^0 - \frac{RT}{nF} \log Q \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde E_h es el potencial del electrodo de semirreacción (expresado en mV), E_h^0 es el potencial de semirreacción estándar en relación con el del hidrógeno (expresado en milivoltios), R la constante universal de gas (8,314 J/mol K), T la temperatura (en grados kelvin), F es la constante de Faraday (96 485 C/mol), n es el número de electrones transferidos y Q un cociente de la reacción (actividad del reductor dividida por la reactividad del oxidante)(Copeland & Lytle, 2014).

Como se demostró en la Sección Propiedades químicas del cloro (2.2.3.1), el pH está estrictamente relacionado con la formación y concentración de OCl^- y el $HOCl$, que a su vez repercute en la medición ORP. Esto mediante datos experimentales, permitió construir la Figura 2.5. Dicha figura ilustra la relación que existe entre el pH, el ORP y la concentración de cloro libre presente, por ejemplo, si se quisiera obtener una concentración 0,6 ppm, se puede conseguir a un pH de 8,0 y un valor ORP de 696 mV o para un pH de 7,5 con un ORP de 758 mV. Por esa razón la configuración más efectiva para desinfectar mediante tecnología ORP, generalmente incluye bombas dosificadoras que regulan el pH y la cantidad de cloro (Etienne, 2011).

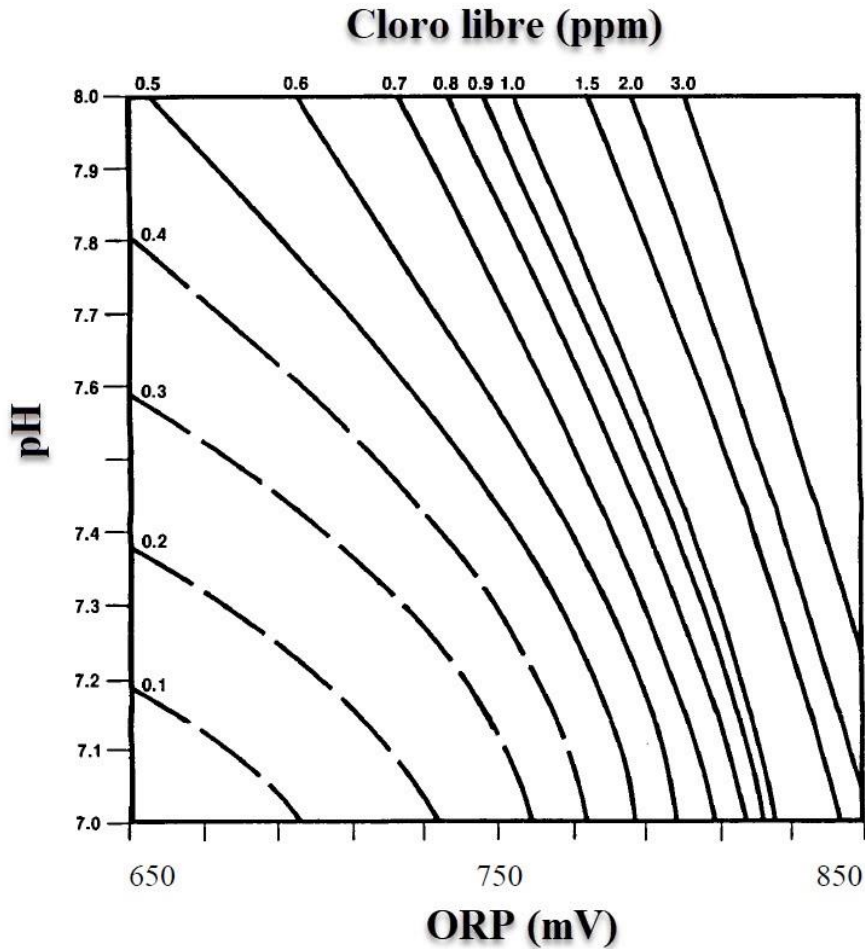


Figura 2.5 Variación del ORP por el cloro libre en función del pH (modificado de Steininger, 1985)

Las mediciones de ORP utilizadas en desinfección del agua, con valores entre 650-750 mV mostraron ser efectivos antimicrobianos del agua, independientemente de la calidad de esta (Kunz et al., 2017; Steininger, 1985), incluso la WHO recomienda valores por encima de 650 mV (Etienne, 2011). Por encima de los 650 mV gran cantidad de microorganismos patógenos son eliminados en un lapso de tiempo entre 10 y 30 segundos, como lo muestra el Cuadro 2.7. Algunas levaduras de descomposición y hongos formadores de esporas también mueren a estos niveles (650 mV) después de un tiempo de contacto de unos minutos o menos (Suslow, 2004).

Cuadro 2.7 Resultados de estudios de simulación de laboratorio y de encuestas de hidrofriaderos comerciales (Suslow, 2004)

Patógeno	Tiempo de supervivencia para diferentes niveles de ORP (mV)		
	< 485	550 < x < 620	> 665
<i>E. coli</i> O157:H7	> 300 s	< 60 s	< 10 s
<i>Salmonella spp.</i>	> 300 s	> 300 s	< 20 s
<i>Listeria monocytogenes</i>	> 300 s	> 300 s	< 30 s
Coliformes termotolerantes	> 48 h	> 48 h	< 30 s

Incluso una alta concentración de virus puede ser inactivada en una relación exponencial y de forma casi instantánea con valores de ORP ≥ 650 mV (Steininger, 1990). El ORP ha demostrado ser un indicador más confiable de la calidad bacteriológica, que los coliformes totales y fecales, ya que aguas con un ORP ≥ 650 mV han estado dentro de los parámetros bacteriológicamente aceptables (Steininger, 1985).

Los autores Maharjan, Clark, Kuenzel, Foy, & Watkins (2016) encontraron en su investigación que un ORP por encima de 600 mV, es un valor adecuado para eliminar la mayoría de virus y bacterias. En un estudio con valores de ORP entre 295 mV y 867 mV, encontraron que en los recuentos de placas de pseudomonas fueron altos en aguas tratadas con un ORP por debajo de los 650 mV (Steininger, 1985).

El ORP es el potencial (voltaje) al cual ocurre la oxidación en el ánodo (positivo) y la reducción ocurre en el cátodo (negativo) de una celda electroquímica. Microbiológicamente, un agente oxidante aleja los electrones de la membrana celular, desestabilizándola y provocando fugas y una muerte rápida del microorganismo (Suslow, 2004).

Como se explicó en la sección 2.4.1, el DPD no distingue la cuantificación entre las especies de cloro libre (HOCL y OCL⁻). Al utilizar ORP, si el pH sube a niveles en los que la desinfección no es adecuada, es decir, donde la concentración de ión hipoclorito predomina, el valor de ORP, disminuiría y si está por debajo de los 650 mV, no se estaría llevando a cabo una correcta desinfección. Lo anterior nos señala que corroborar el proceso de desinfección en tiempo real al usar ORP, es una ventaja (Newman, 2004).

Es importante prestarle atención a aspectos operativos del ORP como el mantenimiento, la calibración y la sobresaturación del sensor por sobreinyección de desinfectante, lo que afectaría su capacidad de respuesta por algunos minutos (Suslow, 2004). Además, la limpieza del sensor es importante para evitar discrepancias entre el valores calculados para una muestra y el valor experimental debido a la contaminación del instrumento (Galster, 2000).

A pesar de las ventajas de esta tecnología, no se usa de manera generalizada por problemas de confiabilidad de los electrodos y la carencia de alguna normativa o referencias en cuanto a cuáles deben ser las medidas para una determinada calidad de agua (Copeland & Lytle, 2014). Pese a las desventajas, los electrodos ORP pueden garantizar una interpretación confiable y adecuada de las mediciones con un mantenimiento realizado periódicamente por personal técnico calificado (Capodaglio & Callegari, 2009; Copeland & Lytle, 2014).

En la Figura 2.6 muestra una posible configuración en la que se emplea la desinfección asistida por ORP, que consta de un sensor, una bomba dosificadora que provee hipoclorito de sodio al sistema, un panel de control interconectado con el sensor y la bomba, el cloro aplicado se junta con el agua cruda en el tanque de almacenamiento.

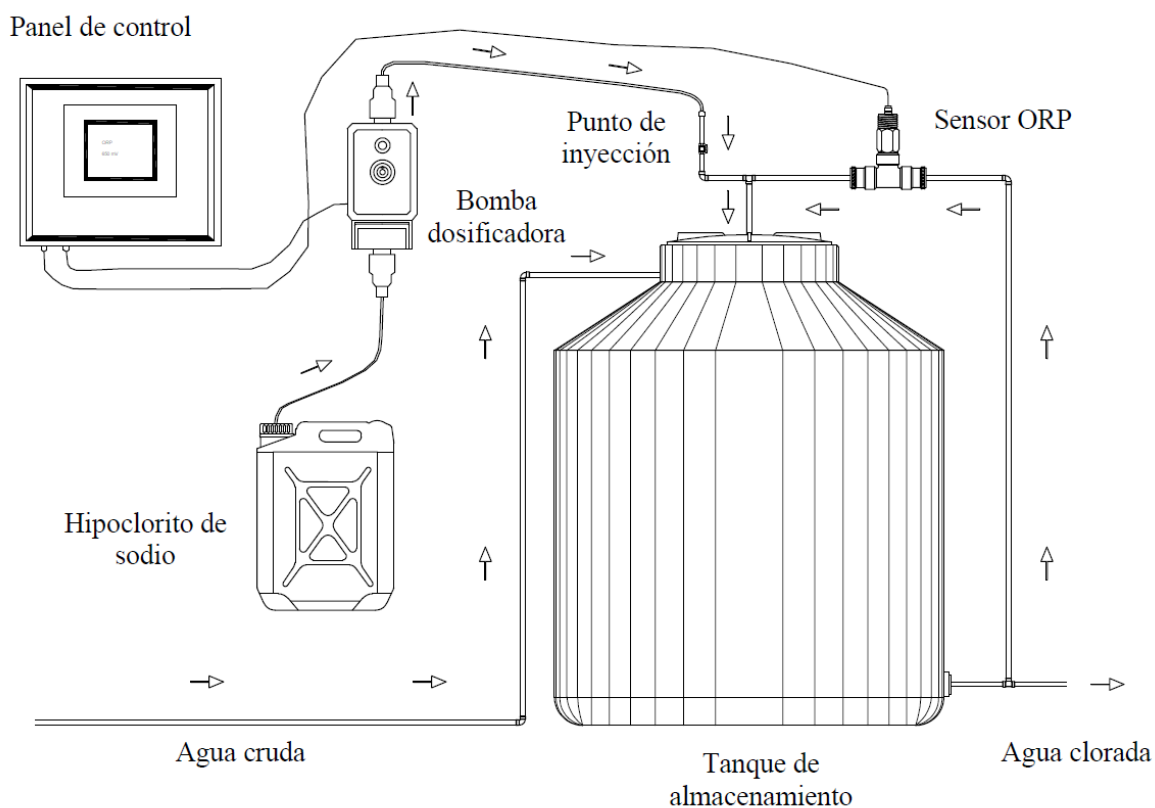


Figura 2.6 Configuración aplicada al caso de estudio

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas y mediciones que realizaron en el Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), el Laboratorio de Aguas de la Escuela de Ingeniería Ambiental, la ASADA de Cooperosales y en el centro comercial.

En Cooperosales se implementaron varios sistemas de cloración, se monitoreó su funcionamiento y se realizaron mejoras que permitieran la correcta desinfección. Inicialmente se planteó automatizar la desinfección en el acueducto de la ASADA de Cooperosales, pero debido a las dificultades que representó la pandemia del COVID-19 y falta de una fuente eléctrica, se debió implementar este proceso en un centro comercial ubicado en Calle Blancos, San José, donde se realizó la automatización mediante un sensor ORP y una bomba dosificadora de hipoclorito de sodio.

3.1 COOPEROSALES

3.1.1 Descripción del sitio

La ASADA de Cooperosales, se encuentra ubicada en el distrito de San Nicolás, cantón Cartago y provincia Cartago. La comunidad de Cooperosales está localizada aproximadamente a 5 km al noroeste del centro de Cartago (Figura 3.1) y cuenta con 168 abonados, tiene una densidad poblacional de 4,1 personas por hogar (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011), para un aproximado de 688 personas.

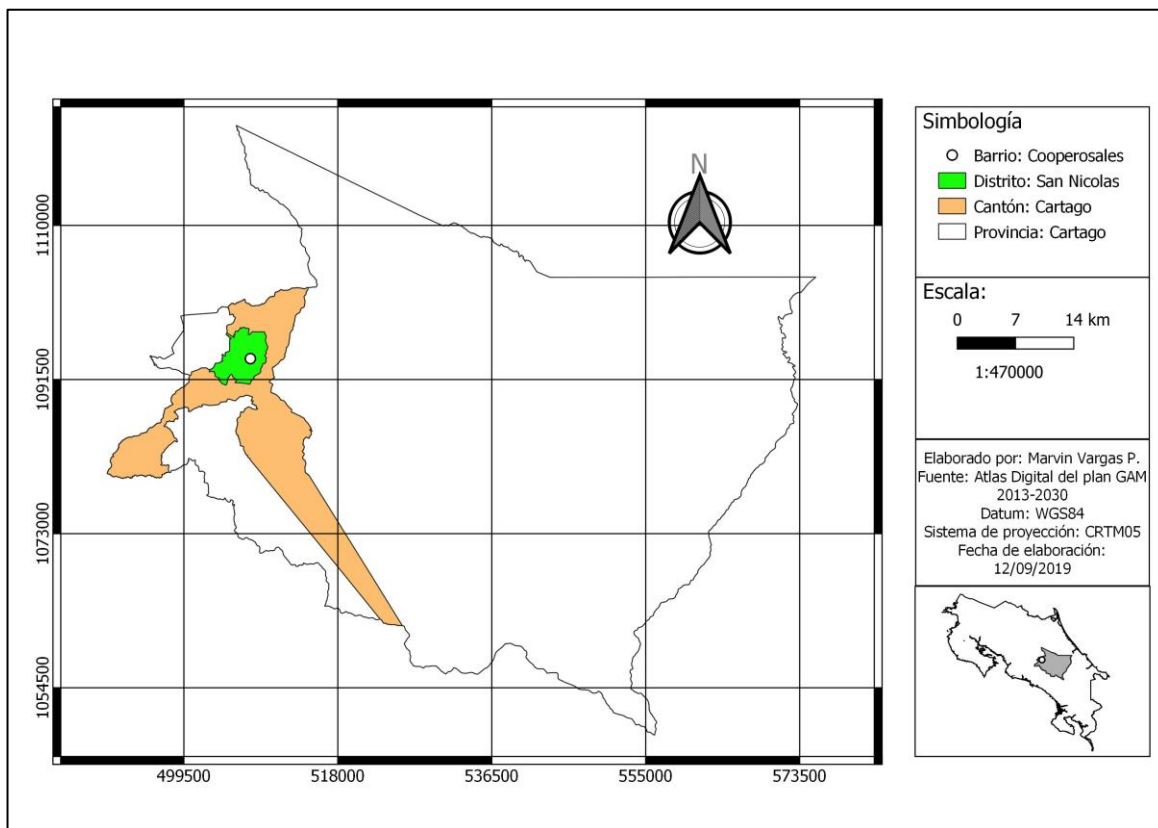


Figura 3.1 Ubicación de la ASADA con la que se trabajó

La ASADA cuenta con dos nacientes, ubicadas a 6 km norte de Cooperosales, en la comunidad de Llano Grande (Barret, 2019). El agua mezclada de las dos fuentes es conducida hasta al sistema de cloración en Cooperosales. Al momento de iniciar el trabajo en la ASADA, se tenía un clorador artesanal construido en PVC (operado con tabletas de ácido tricloroisocianúrico) (Figura 3.6 y Figura A.1.4 del Apéndice 1) sin medidores de caudal que permitieran una dosificación adecuada y conocida del cloro que se aplica al agua que abastece la comunidad, se cuenta con cuatro tanques de almacenamiento de PVC (Figura 3.2).

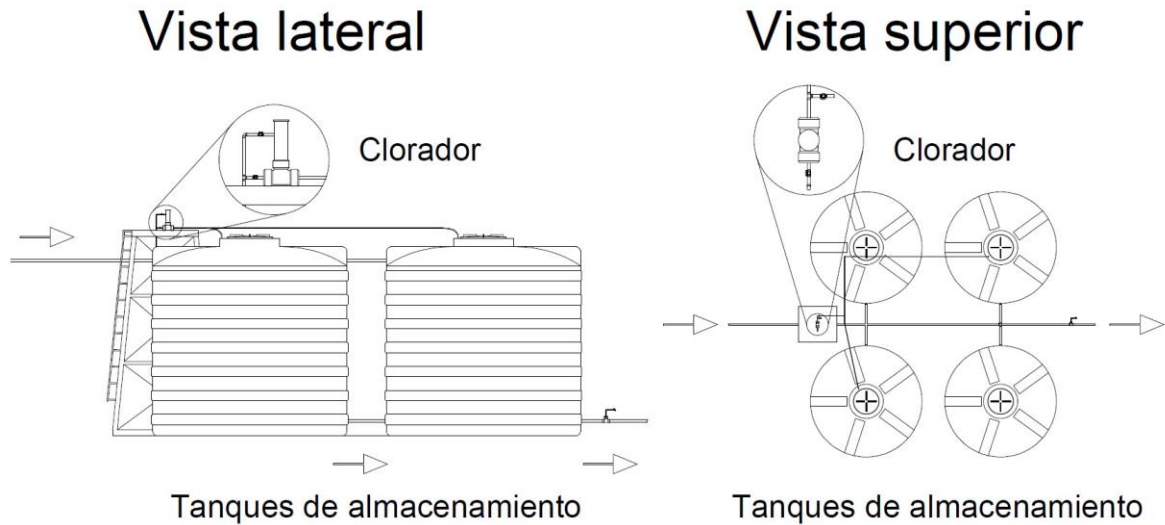


Figura 3.2 Distribución de los elementos de las instalaciones de desinfección a Junio de 2019

Por medio de intervenciones y recomendaciones, realizadas por Barret (2019), se instaló un equipo de cloración de la marca Accu-Tab con un flujómetro. Este clorador utiliza pastillas de hipoclorito de calcio, cuenta con sus respectivas patentes y certificaciones que respaldan el uso de los mismos en agua potable. Entre las cuales cabe destacar mencionar el registro ante la EPA (Registro #748-295), la NSF (estándares 60 y 61), The United States Department of Agriculture (USDA) (Food Contact Substance 1 023), American Water Works Association (AWWA) (B-300), Canadian Food Inspection Agency (CFIA), Health Canada, además cumple con los requisitos de la Washington State Department of Agriculture (WSDA) y Organic Materials Review Institute (OMRI) para su uso en procesamiento orgánico (PPG Industries, 2009).

Como parte de las sugerencias de Barret (2019), se instaló un tanque de 1 100 L para asegurar la correcta mezcla del agua con el cloro (Figura 3.3).. Así como su distribución de forma homogénea en los cuatro tanques de almacenamiento de 22 000 L cada uno, porque con el sistema artesanal, no se daba una distribución equitativa del cloro en los tanques de almacenamiento

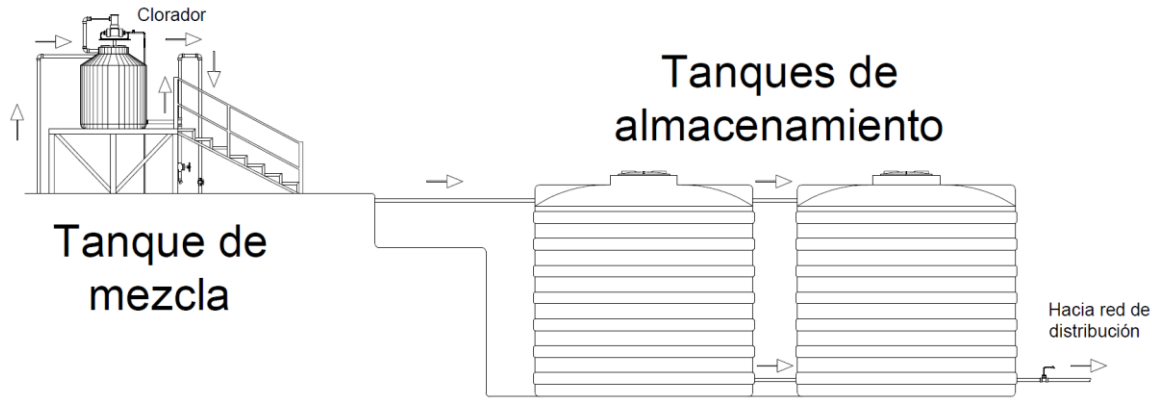


Figura 3.3 Distribución general de los elementos presentes en la ASADA de Cooperosales

3.1.2 Determinación de la demanda de cloro

3.1.2.1 Recolección de la muestra

El 11 de marzo de 2020 se tomó una muestra de agua cruda (sin cloro), justo antes de entrar al tanque de mezcla, en el acueducto de Cooperosales. Se recolectó un volumen de cuatro litros de agua para la realización del análisis.

3.1.2.2 Preparación de la disolución madre de 100 ppm de cloro

Se preparó una disolución madre, a partir de una botella de cloro comercial marca Supermax, de 250,0 mL y una concentración 3,0% m/m. Para la determinación de la concentración real del cloro comercial, se tomó una muestra y se le realizaron dos diluciones, la primera fue de 5,00 mL en un balón de 1 000,0 mL, dilución de la que se tomó 1,00 mL, que fue diluido en un balón de 100,0 mL. A esta última dilución se le midió la concentración de cloro libre para obtener un valor de 30 300 mg/L de Cl_2 . A partir del cloro comercial, se preparó la disolución madre de 100 ppm con una alícuota de 3,75 mL, en un balón de 1 000,00 mL y se aforó con agua desionizada.

3.1.2.3 Demanda de cloro

Este análisis se llevó a cabo el 12 de marzo de 2020, siguiendo la metodología propuesta por Iburguen-Castañeda & Bernal-Mejía (2008) y López (2001).

Se colocó 50 mL de la muestra en trece beakers y uno extra para el blanco (que contiene agua destilada en lugar de muestra). Cada Beaker se cubrió con papel aluminio para evitar la degradación del cloro por la luz y se rotularon.

Para la elaboración de la curva las alícuotas de la disolución madre se calcularon de la siguiente manera (Ecuación 9):

$$\text{Alícuota dn madre (mL)} = \frac{C_i \times v}{C_{dm}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

C_i es la concentración inicial (mg/L)

v es el volumen de la muestra (mL)

C_{dm} es la concentración de la disolución madre (mg/L).

Las dosis de la disolución madre de cloro para cada muestra variaron entre 0,3 y 1,2 ppm, el detalle para cada muestra se encuentran en el Apéndice 2.

Se desfasó la aplicación de la disolución madre, diez minutos entre repetición, para un minucioso control en los tiempos de reacción del cloro. Cada muestra reaccionó por treinta minutos, tiempo recomendado para las instalaciones de desinfección y así lograr una correcta desinfección (World Health Organization, 2017), todo esto al abrigo de la luz. Pasado el tiempo de reacción de las muestras, se midió el cloro libre por DPD según la metodología descrita en la sección 3.1.3.1. Con los resultados se construyó el gráfico de demanda de cloro y se determinó el punto de quiebre del agua del acueducto de la ASADA de Cooperosales.

3.1.3 Monitoreo de la concentración de Cloro libre en la ASADA de Cooperosales

3.1.3.1 Determinación de cloro

La medición de cloro libre se realizó siguiendo el método DPD, usando un Hach Pocket ColorimeterTM II y el reactivo DPD para cloro libre en almohadillas para muestras de 10 mL. El medidor de cloro libre, se utilizó en el rango bajo, que permite lecturas de concentración entre 0,02 y 2,0 mg/L. En el caso de las muestras a la salida del clorador se diluyó 1,00 mL de muestra en un balón aforado de 100,00 mL.

3.1.3.2 Sitios seleccionados para llevar a cabo los muestreos

3.1.3.2.1 Muestreo al clorador artesanal de cámara seca

Inicialmente, la ASADA de Cooperosales, contaba con un clorador artesanal, ubicado cerca de los tanques de almacenamiento (Figura 3.2 y Figura A.1.4 del Apéndice 1), donde solo era posible monitorear el cloro libre a la salida del clorador, en el punto D (Figura 3.6) y a la salida de los tanques de almacenamiento, el punto C (Figura 3.5 y Figura A.1.3 del Apéndice 1).

3.1.3.2.2 Muestreos a los cloradores instalados en el tanque de mezcla

La Figura 3.3 muestra la distribución de los elementos que conforman la unidad de desinfección, una vez instalado el tanque de mezcla y la unidad de almacenamiento con cuatro tanques, todo funciona por gravedad.

El agua cruda viene de las nacientes por una tubería de 2" que alimenta el tanque de mezcla. De esta tubería se conecta una de 1/2" que abastece el clorador, del cual, el agua clorada y concentrada, también llega al tanque de mezcla. A la salida del clorador se tomaron muestras, lo que se denominó como Punto A (Figura 3.4 y Figura A.1.1 del Apéndice 1). Utilizando la Figura A.1 (Anexo 1), de la ficha técnica del fabricante del clorador Accu-Tab y las estimaciones que se encuentran en el Apéndice 12, se determinó que en el Punto A, se esperarían concentraciones de cloro libre de 60 mg/L.

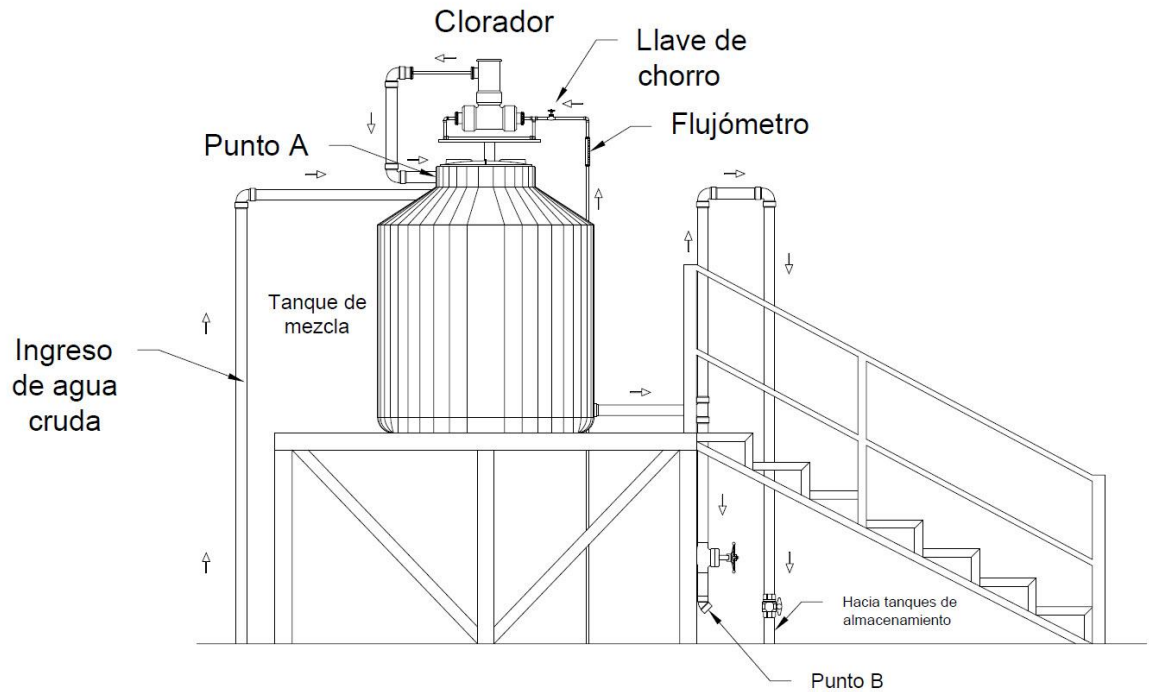


Figura 3.4 Detalle del tanque de mezcla

Una vez que mezcló el agua cruda con cloro proveniente del Punto A, el agua sale hacia los tanques de almacenamiento. Entre el tanque de mezcla y los tanques de almacenamiento se ubica una llave para los lavados del tanque de mezcla, pero también funciona como punto de muestreo, este se denominó Punto B (Figura 3.4 y Figura A.1.2 del Apéndice 1). En este punto se esperó encontrar una concentración aproximada de 1,25 mg/L de cloro, para satisfacer la demanda durante la estancia en los tanques de almacenamiento y lograr una concentración de cloro libre entre 0,30 y 0,60 mg/L. Este primer tanque, proporcionó una mezcla de agua con cloro, pero no se cumple con el tiempo de contacto mínimo de 30 min requerido para que el cloro reaccione con los contaminantes que puedan estar presentes, este tiempo lo cumple en los tanques de almacenamiento que asumiendo un flujo promedio de 2,5 L/s reportado por Barret (2019) y el volumen de los cuatro tanques de 22m³ cada uno, es del orden de las 9 horas aproximadamente.

Los cuatro tanques de almacenamiento se abastecen de una misma tubería que divide su caudal entre ellos, el ingreso del agua es por la parte superior, al igual que el egreso del rebalse. El agua tratada sale por la parte inferior de los tanques, llegando a un punto de reunión, donde hay una llave para muestreos, que fue denominada como Punto C (Figura 3.5

y Figura A.1.3 del Apéndice 1). Luego del punto de reunión, el agua sale a la red de distribución y acá se esperaba tener una concentración de cloro libre que esté en el rango entre 0,30 y 0,60 mg/L basados en la legislación costarricense y congruente con la demanda de cloro y la concentración de cloro en el Punto B.

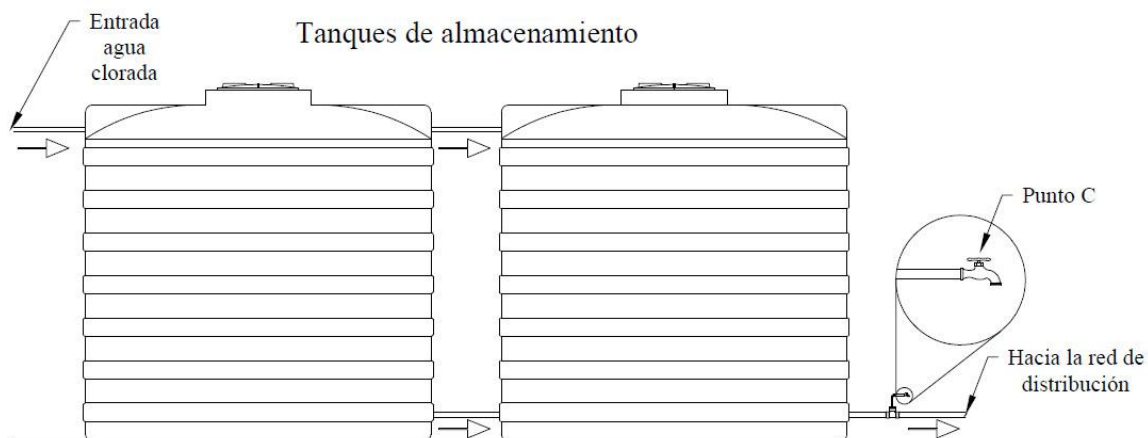


Figura 3.5 Ubicación del Punto C de muestreo

3.1.4 Cloradores

Inicialmente y antes de la instalación del tanque de mezcla, se evaluó el clorador artesanal de cámara seca original de la ASADA de Cooperosales. Posteriormente se instaló el tanque de mezcla y se evaluaron el clorador de cámara seca Accu-Tab, el clorador artesanal de cámara seca original, pero con algunas modificaciones que mejoraran su funcionamiento y por último el clorador artesanal de cámara húmeda.

3.1.4.1 Clorador artesanal de cámara seca original de Cooperosales

Este clorador lo tenía la ASADA. Dado que no se contaba con el tanque de mezcla ni flujómetro, el clorador estaba ubicado en una estructura metálica a la altura de los tanques de almacenamiento (Figura A.1.4 del Apéndice 1) y suministraba cloro a tres de los cuatro tanques de almacenamiento instalados, mediante tubos de PVC independientes (Figura A.1.8 del Apéndice 1).

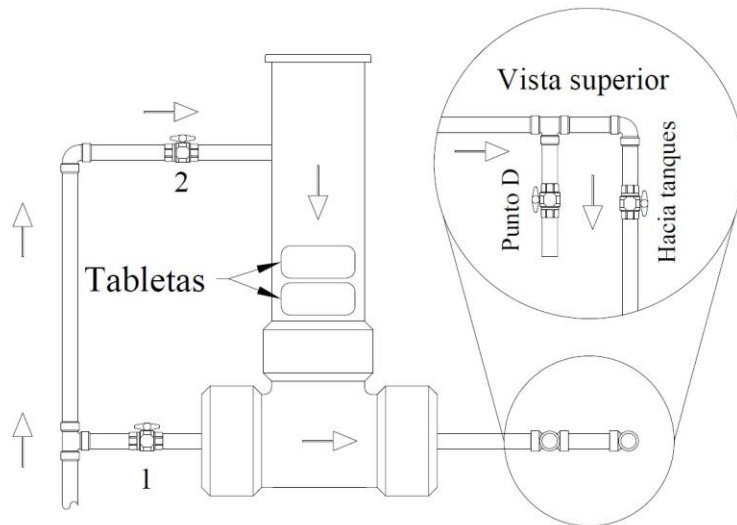


Figura 3.6 Clorador artesanal de cámara seca

El clorador de la Figura 3.6 contó con las llaves de paso 1 y 2, de las cuales, la 1 siempre permaneció cerrada y la 2 se utilizó para regular el caudal de cloración, que atravesó la cámara de arriba hacia abajo, para de esta forma desgastar las tabletas de ácido tricloroisocianúrico. El funcionamiento de este sistema se midió los días 06 y 30 de setiembre de 2019 y no contó con flujómetro. Para este análisis se tomaron muestras a la salida del clorador artesanal, designado como Punto D (Figura 3.6) y a la salida de los tanques de almacenamiento, es decir, en el Punto C (Figura 3.5). La muestra en D se obtuvo concentrada, por lo que se siguió el proceso de dilución de la misma en una proporción 1/100.

3.1.4.2 Clorador Accu-Tab:

Una vez implementado el tanque de mezcla se iniciaron una serie de mediciones. Primeramente, con el clorador marca Accu-Tab (Figura 3.7 y Figura A.1.5 del Apéndice 1) que es un sistema de cámara seca, en donde el agua cruda ingresa por una tubería de 1/2", desgasta las tabletas de hipoclorito de calcio en la parte inferior y sale casi al mismo nivel, pero por una tubería de 1 1/2". Las pastillas realizan una liberación del cloro en función del caudal, por lo que es importante mantener un control sobre este.

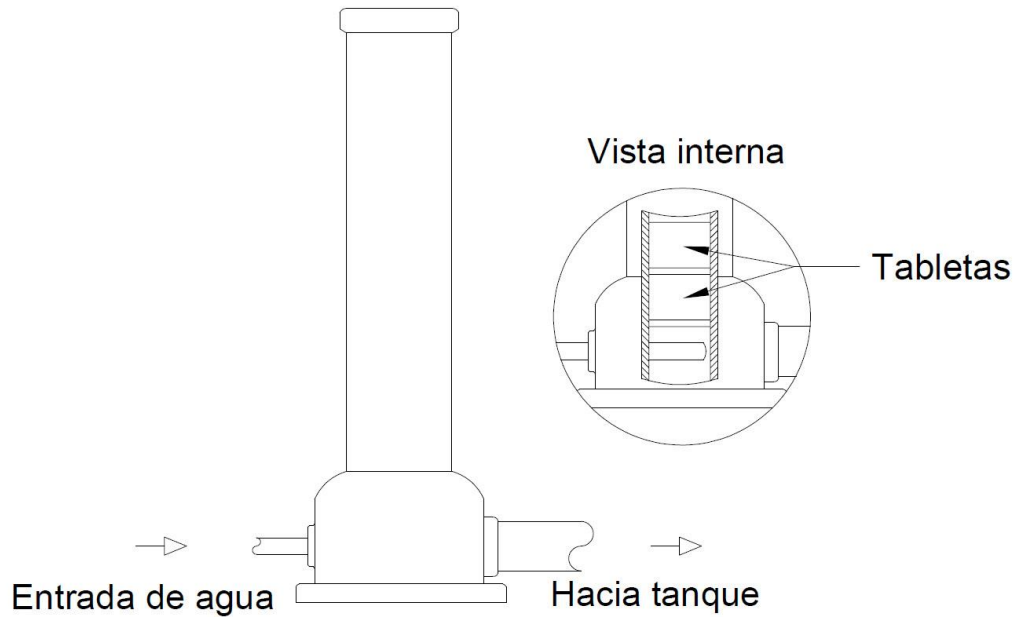


Figura 3.7 Clorador Accu-Tab

La regulación del caudal de entrada se controló por medio de una llave de chorro, unida a un flujómetro, para tener una medición del caudal que se empleó (Figura 3.4). Con las estimaciones del Apéndice 12, fue posible determinar un caudal de cloración de 3,12 L/min para obtener una dosis de 1,25 mg/L (en el Punto B), con el caudal de entrada promedio de 150 L/min que encontró Barret (2019). Además, Barret (2019) reportó que se necesitaba colocar un flujómetro que comprendiera una escala entre los 0,0 – 5,0 L/min, por eso se instaló uno con escala entre 0,4 y 4,0 L/min.

Las mediciones con este sistema se iniciaron a partir del día 01 de octubre de 2019, con un flujómetro marca Blue-White con escala comprendida entre 2,0 y 20,0 L/min, se utilizó otro de la misma marca, pero con escala entre 0,4 y 4,0 L/min. El cloro libre se midió a la salida del clorador (en el Punto A), después del tanque de mezcla (Punto B) y a la salida de los tanques de almacenamiento (Punto C).

3.1.4.3 Evaluación y mejoras al clorador artesanal de cámara seca original de Cooperosales

Luego de las mediciones realizadas al clorador Accu-Tab, se retiró y en su lugar, se instaló el clorador artesanal con el que contaba la ASADA de Cooperosales (Figura 3.8 y

Figura A.1.6 del Apéndice 1). El clorador artesanal fue reubicado a un lado del tanque de mezcla, además se le adicionaron dos llaves de chorro (llaves 3 y 4) (Figura 3.8), así como la colocación de un flujómetro. La llave de paso #1 permaneció cerrada en todo momento y la llave de paso #2 ahora se utilizó completamente abierta, porque el control del flujo de cloración se dio con la llave de chorro #3.

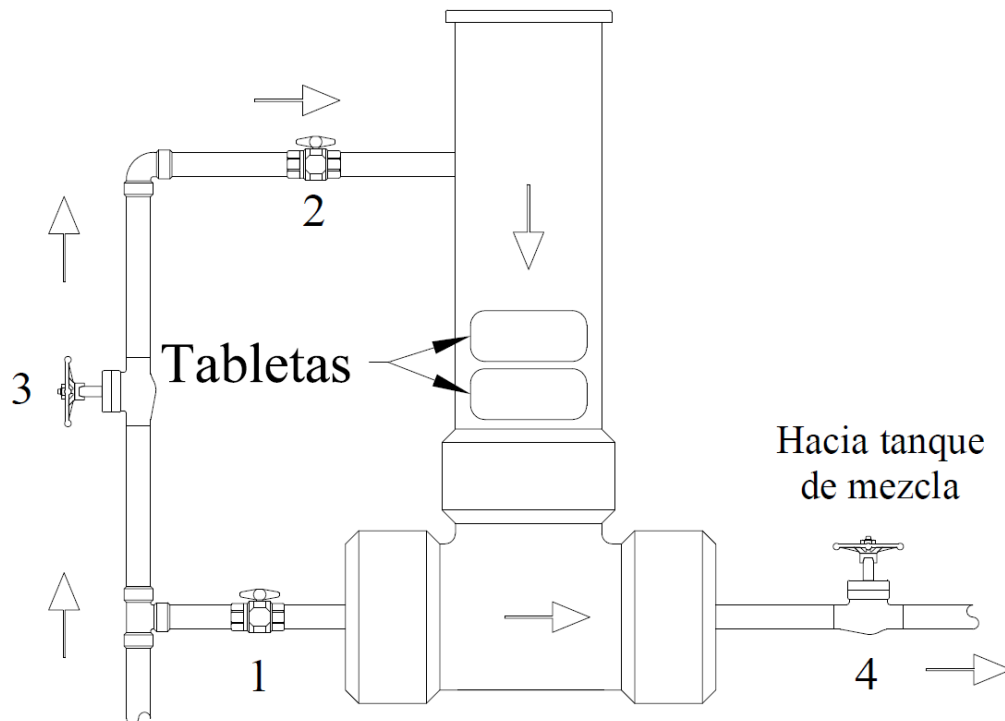


Figura 3.8 Clorador artesanal de cámara seca y con sus mejoras

Con respecto a la pastilla de cloración, se utilizó ácido tricloroisocianúrico, ya que el agua cruda ingresa por la parte superior, bañando por completo la tableta, por eso no es recomendable utilizar hipoclorito de calcio, por ser más soluble que el ácido tricloroisocianúrico (González-Vargas, 2011).

Por debajo de los 2,00 L/min, el agua cruda que ingresó al clorador artesanal modificado, se deslizó sobre las paredes internas, impidiendo que se mojara la pastilla de manera adecuada y de esta forma solo se erosionaba una parte de la misma. Por lo que se le implementó un dispersor fabricado sobre un plástico flexible con agujeros, con el mismo diámetro de la cámara de cloración y un alambre para su extracción (Figura 3.9).



Figura 3.9 Dispensor para la distribución del agua cruda sobre la pastilla

Las mediciones para este clorador iniciaron el día 26 de noviembre de 2019 hasta el 17 de enero de 2020, con un flujómetro marca LZT, modelo M-15, con escala entre 0,50 y 4,00 L/min, las muestras se obtuvieron en el Punto A (a la salida del clorador), Punto B (después del tanque de mezcla) y en el Punto C (después de los tanques de almacenamiento).

3.1.4.4 Desarrollo del clorador artesanal de cámara húmeda

Se sustituyó el clorador artesanal de cámara seca de la ASADA, por uno artesanal de cámara húmeda con un diseño distinto (Figura 3.10 y Figura A.1.7 del Apéndice 1), ya que en este el agua ingresó por la parte inferior de la cámara de solución, subiendo por la misma y haciendo contacto con las tabletas de ácido tricloroisocianúrico. El agua clorada sale por una tubería que está a un nivel superior al de las tabletas, lo que hizo que se formara una acumulación de agua (conocida como cámara húmeda). El diseño se tomó y adaptó de un video tutorial encontrado en la web, de PNUD Costa Rica (2019).

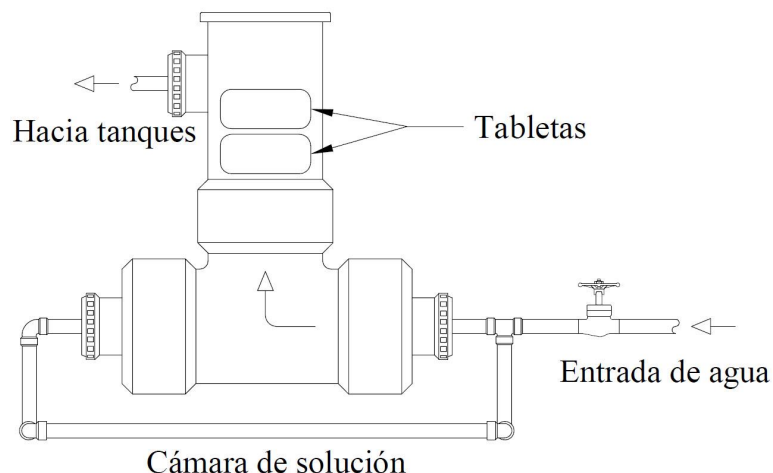


Figura 3.10 Clorador artesanal de cámara húmeda y su posicionamiento

La diferencia entre ambos cloradores artesanales, radica en el sentido de la alimentación del agua cruda, ya que el clorador artesanal de la ASADA (Figura 3.8) recibía el agua por encima de la pastilla y no siempre estaba en contacto con el agua.

El día 20 de enero de 2020, se instaló el clorador artesanal de cámara húmeda y se monitoreó entre los días 22 y 24 de enero, con el mismo flujómetro marca LZT, modelo M-15, las muestras se obtuvieron a la salida del clorador (Punto A), después del tanque de mezcla (Punto B) y después de los tanques de almacenamiento (Punto C).

Debido a la pandemia, no se pudieron realizar mediciones de cloro libre suficientes para este clorador, por lo que se apoyó en los recabados por el señor José Cordero, abonado N° 115 de la ASADA, que tomó una muestra diaria entre las 6:00 y 8:00, entre los meses de julio y diciembre del 2020. Para la medición de estos datos se utilizó un equipo marca HANNA, modelo HI701, con un rango de lecturas comprendidas entre 0,00 hasta 2,50 ppm y se utilizó el reactivo para cloro libre, código HI701, para muestras de 10,0 mL, de la misma marca.

3.1.5 Caudales teóricos del agua cruda al entrar al sistema

Por las condiciones propias del Acueducto de Cooperosales, no se pudo instalar un equipo que cuantificara el caudal de agua cruda que ingresó al sistema al dosificar el cloro, por lo que se decidió determinar de forma teórica.

Para la determinación de los caudales teóricos de agua cruda, se utilizó el flujómetro del clorador que indicó el caudal, para relacionar el dato con las concentraciones de cloro libre y comparar los datos contra la medición realizada por Barret (2019) con un equipo de medición ultrasónico que determinó un caudal promedio de 150,0 L/min.

El cálculo teórico del caudal de agua que ingresó al sistema, se consiguió aplicando la Ecuación 10:

$$Q_2 = \frac{Q_1 C_1}{C_2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

Q₁: Caudal registrado en el flujómetro del clorador

C₁: Concentración registrada en el Punto A

Q₂: Caudal de ingreso al sistema (la incógnita)

C₂: Concentración registrada en el Punto B

3.2 CENTRO COMERCIAL

3.2.1 Descripción del sitio

Este centro comercial se encuentra ubicada en el distrito de Calle Blancos, cantón de Goicoechea, provincia de San José (Figura 3.11). En este centro comercial se ubican varios locales comerciales que arriendan las instalaciones para llevar a cabo sus actividades económicas.

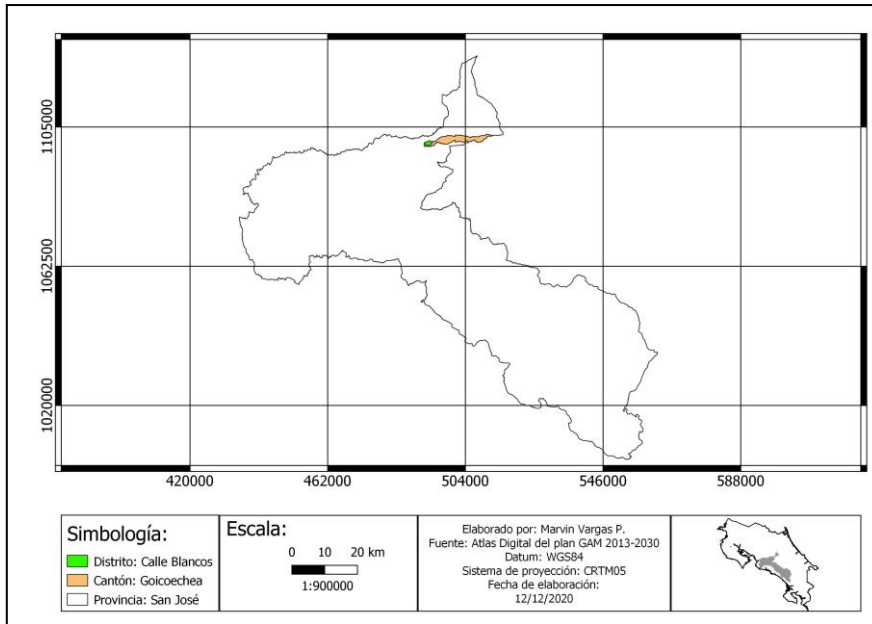


Figura 3.11 Ubicación del centro comercial donde se instaló el sistema ORP

3.2.2 Sistema de Cloración

El agua tratada viene preclorada por el proveedor oficial, pero se implementó este sistema porque en algunas ocasiones no se reciben niveles de cloro adecuados. El sistema automatizado consta de un panel de control, que recibe la señal del sensor ORP, este mide el potencial de oxidación-reducción del agua que sale hacia la red de distribución del centro comercial, esta agua utilizada para la medición es recirculada al tanque de almacenamiento (Figura 3.12). El panel de control responde a las señales del sensor, que al mismo tiempo controla una bomba dosificadora que aplica hipoclorito de sodio, ya sea que se necesite cloro o que, por el contrario, cierre el suministro. El desinfectante es entregado por la bomba dosificadora en un punto de inyección que lo conduce a través de una tubería, hasta el tanque de almacenamiento.

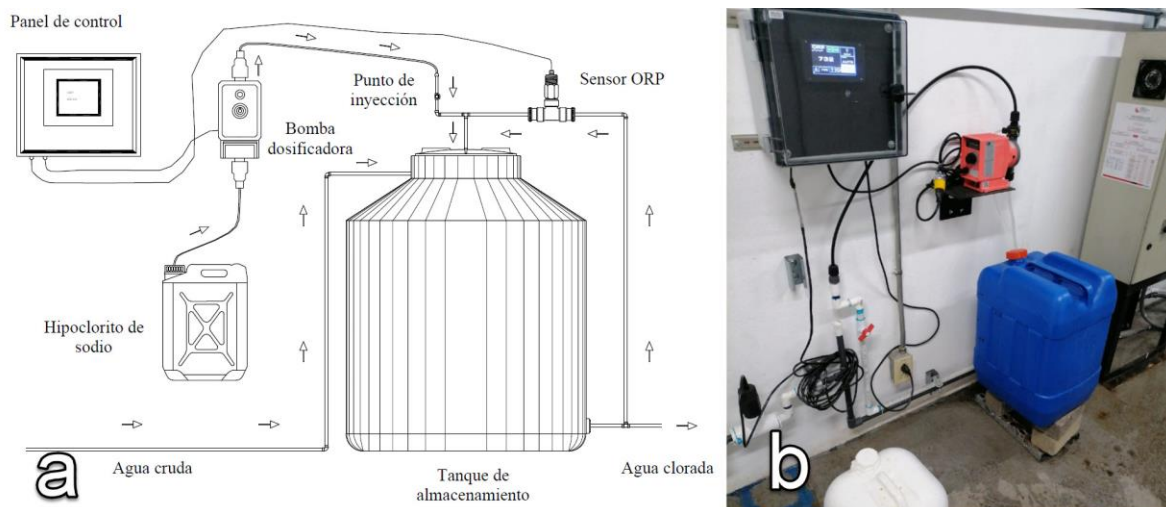


Figura 3.12 (a) Diagrama de la distribución de los componentes del sistema de cloración automatizada (b) fotografía del sistema de dosificación

El sistema cuenta con un panel de control modelo ORP104, con una pantalla táctil de 4,3 pulgadas, con una alimentación de 110 a 120 V y con capacidad de complementarse con una electroválvula o una bomba dosificadora. El electrodo ORP, es marca Sensorex, modelo S7420CD-ORP, con un rango de medición de -2 000 mV a 2 000 mV, con capacidad para un flujo máximo de 3 m³/s, en este caso se trabajó con un flujo de unos pocos litros por hora. La bomba dosificadora es marca LMI, modelo U031-281TT, de 120 V y con capacidad máxima de salida de 6 a 30 galones por día a 80 psi. Esta bomba aplica el hipoclorito de sodio contenido en un recipiente plástico, grande y oscuro.

3.2.3 Monitoreo del cloro libre en el centro comercial

El registro de los datos se llevó a cabo, a través del personal de mantenimiento del edificio, quienes reportaron las lecturas del sistema ORP y midieron cloro libre con el dispositivo marca eXact, modelo iDip® 525 y reactivo DPD-1 (para cloro libre) de la misma marca.

Todas las lecturas ORP, se obtuvieron del display del controlador, instalado para el tanque B8. Todas las muestras de cloro libre se tomaron inmediatamente luego de registrar el valor ORP. El mes de noviembre de 2020 la muestra de cloro libre se tomó de una pileta del centro comercial, que estaba en la red de distribución luego del tanque de almacenamiento. El mes de enero de 2021, la muestras para medir cloro libre se tomaron en

distintos puntos de la red centro comercial, como lo fueron un supermercado, un comedor, la pileta, una cocina y en propio tanque B8. En el centro comercial se buscó tener concentraciones de cloro libre comprendidas entre 0,30 y 1,00 mg/L, esto por decisión de los operadores del sistema.

3.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS POR CAMBIOS EN LA LEGISLACIÓN

La legislación nacional en su Decreto Ejecutivo N° 38924-S del 2015, establecía el cloro libre residual debía estar dentro del rango de los 0,30 y 0,60 mg/L.

En el año 2020, debido a la pandemia del COVID-19, se modificó el reglamento con el decreto N° 42332-S, donde se estableció el cloro libre residual entre 0,30 y 1,00 mg/L, por un periodo de seis meses, a partir de su publicación (publicado en la Gaceta del 18 de diciembre de 2020) (Imprenta Nacional, 2020).

Debido a esta situación, en la discusión de los resultados se presentará un análisis estadístico de los datos, para comprender los escenarios con la legislación en el rango de cloro libre residual comprendido entre los 0,30 a 0,60 mg/L y para el rango de 0,30 y 1,00 mg/L para cada los diferentes cloradores y para el proceso de automatización. Para la determinación se tomaron los datos del cloro libre a la salida de los tanques de almacenamiento (Punto C) para la ASADA y para el centro comercial.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En Costa Rica, en general se realiza la desinfección con cloro, que aunque no es la mejor opción, es la que mejor se adapta a las condiciones del país por su bajo costo, efecto residual y su seguridad cuando es manejado de manera adecuada (Bolaños-Alfaro, 2013). Seguidamente se presentan y discuten los resultados obtenidos en la ASADA Cooperosales con los cloradores evaluados y los resultados obtenidos en el centro comercial por la dosificación de hipoclorito de sodio controlado por ORP.

4.1 ESTUDIO DE CASO: COOPEROSALES

4.1.1 Demanda de cloro

Para la demanda de cloro en la ASADA de Cooperosales, se realizó un análisis del agua de la misma, que permitió la construcción una curva de demanda de cloro.

La curva de demanda de cloro se muestra en la Figura 4.1 (datos en el Apéndice 3, Cuadro A.3.1), inicialmente hasta 0,30 mL de cloro agregado no fue posible asegurar que el agua contiene sustancias reductoras que consuman todo el cloro, pues al agregar 0,30 mg/L de cloro se detectó un residual de 0,10 mg/L de cloro libre. Posteriormente, de 0,30 mg/L a los 0,59 mg/L el cloro agregado se detecta un aumento de cloro libre residual hasta 0,41 mg/L y luego se da una reducción hasta 0,24 mg/L al agregar 0,65 mg/L para nuevamente aumentar el cloro residual. Según Ritter (2010), en este caso, al adicionar de 0,30 a 0,59 mg/L el cloro reacciona con materia orgánica y amoníaco formando principalmente cloraminas, del rango de 0,59 a 0,65 mg/L se destruyen parcialmente las cloraminas (el cloro libre residual desciende a 0,24mg/L) y en la concentración de 0,65 mg/L se alcanza el punto de quiebre. A partir de ese punto, el cloro adicionado queda como libre residual. Para cumplir con la legislación debe garantizar cloro libre de 0,30 a 0,60 mg/L. De esta manera, se estima que a la salida del tanque de mezcla la concentración de cloro libre debe ser cercana a 1,25 mg/L, pues en los tanques de almacenamiento se espera un consumo de 0,65 mg/L (este consumo se conoce como demanda de cloro). Como se describió en la sección 3.1.2.3, para la elaboración esta curva solo se midió cloro libre (Figura 4.1), por lo que se considera que hizo

falta la medición de cloro total, para haber obtenido un dato más preciso y de esta forma también incluir el cloro combinado en el análisis.

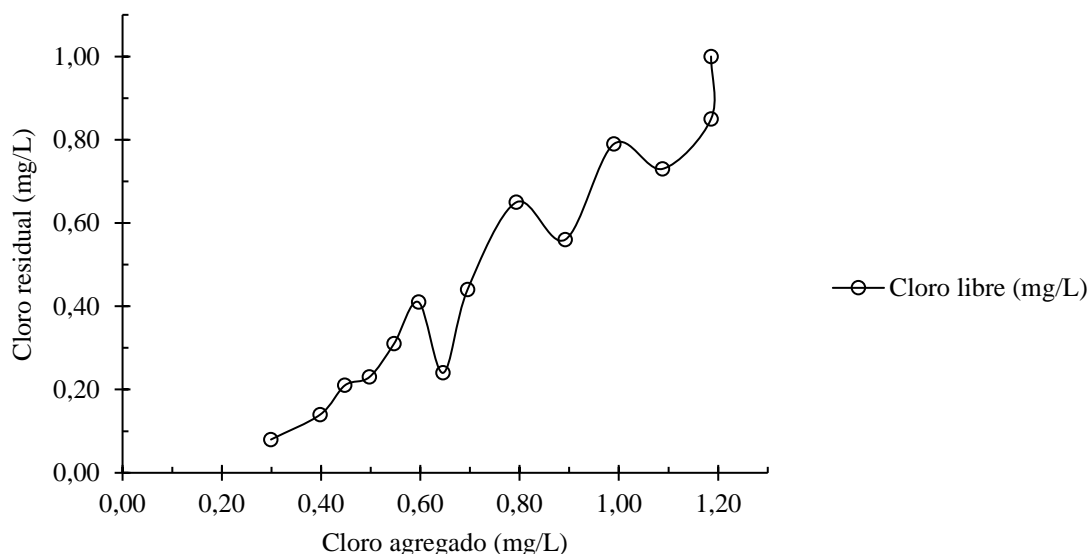


Figura 4.1 Curva demanda de cloro aplicada el día 12 de marzo de 2020

La demanda de cloro obtenida para esta investigación es casi el doble de la reportada por Barret (2019) para la misma fuente, porque su análisis de demanda de cloro fue de 0,30 mg/L, solo que se realizó el 7 de mayo del 2019. Dicha diferencia pudo estar asociada a diferencias climáticas (Kizilaslan, Demirel, & Aral, 2019) que pudieron generar cambios en la calidad del agua, por ejemplo, un aumento de materia orgánica.

4.1.2 Monitoreo del cloro libre en ASADA de Cooperosales

El cloro libre, se midió a la solución de salida de los cloradores Accu-Tab, artesanal de cámara seca (antes y después de su modificación) y artesanal de cámara húmeda (Ver datos Apéndice 12). De los cloradores, solamente en el caso del Accu-Tab, por ser comercial, cuenta con una hoja técnica (Anexo 1). Usando los datos del Apéndice 12, se determinó que para el clorador Accu-Tab y un caudal promedio de ingreso al sistema de 150 L/min y una demanda de cloro estimada de 0,65 mg/L (Sección 4.1.1), se necesitaría un caudal de cloración de 3,12 L/min para conseguir una dosis de cloro libre de 60,0 mg/L en el Punto A,

1,25 mg/L en el Punto B (derivado de la demanda) y así obtener a la salida de los tanques de almacenamiento, el Punto C, una dosis comprendida entre 0,30 y 0,60 mg/L. En principio, se trató de mantener estas condiciones y usarlas como guía para todos los cloradores. Sin embargo, como se expondrá seguidamente no fue posible. En la sección 4.1.3 se discutirá en detalle el efecto de los cloradores y el flujo en la cloración.

4.1.2.1 Clorador Artesanal de cámara seca original de Cooperosales

Los resultados del monitoreo se encuentran en el Apéndice 4 (Cuadro A.4.1 y Cuadro A.4.2) y en la Figura 4.2. Los datos no se acompañan de una medición de caudal en el clorador, por lo que fue difícil realizar cambios en el mismo que permitiera cuantificar la dosificación. Basado en los cálculos del Apéndice 12, anteriormente descritos, se observa que el día 6 de setiembre del 2019, no se alcanzaron los 60 mg/L después del clorador (Punto D). El día 30 setiembre la concentración en el Punto D inició por debajo de los 60 mg/L, pero con el paso del tiempo, superó este valor, esto debido a la inestabilidad del caudal de ingreso al sistema y, por consiguiente, el caudal de cloración que depende del mismo, lo que también se vio reflejado en el Punto C, con algunos valores que cumplieron con la norma y otros que no lo hicieron.

En una investigación realizada por Romero-Esquivel et al. (2021) se llegaron a registrar valores entre 0,03 y 0,05 mg/L de cloro libre en toda la red en una de las rondas de muestreos que se llevaron a cabo en la ASADA de Cooperosales, utilizando este clorador. Esto debido al mal posicionamiento del clorador y la mala dosificación entre tanques, por las tuberías de distribución que no cumplían con su propósito de forma adecuada al pandearse (Figura A.1.4 y Figura A.1.8, Apéndice 1). También podría estar asociado al estancamiento del agua en callejones sin salida o en tanques de almacenamiento, crecimiento biológico, contaminación de la red durante las reparaciones o conexiones cruzadas (Ritter, 2010) la calidad del agua tratada, el tamaño de la red de distribución, el efecto que tiene la configuración que presenta la red y la disposición de las válvulas, así como la edad del agua (Araya-Obando, 2012).

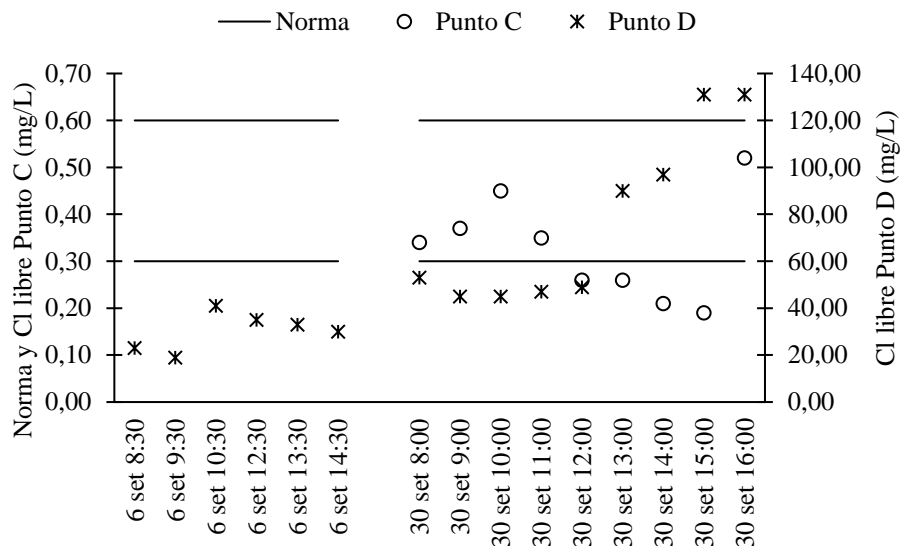


Figura 4.2 Dosificación de cloro libre con clorador artesanal de cámara seca, año 2019

4.1.2.2 Clorador Accu-Tab

Las pruebas y mediciones realizadas al clorador Accu-Tab se compararon con los datos obtenidos de los cálculos del Apéndice 12. La Figura 4.3 (datos en los Apéndices 5 y 6) muestra que para un caudal de 3,5 L/min, la concentración de cloro libre en la salida del tanque de mezcla, Punto B, sobrepasó lo estimado, incluso con caudales de cloración entre 2,0 y 2,5 L/min, lo que llevó al incumplimiento de la normativa en el Punto C. A raíz de esta situación, el día 3 de octubre, para la última medición se reguló el flujómetro a un caudal de cloración por debajo de los 2,0 L/min, el cual no se pudo estimar por la graduación del flujómetro, aunque al día 4 se encontraron valores de cloro libre más bajos que en días anteriores en los Puntos B y C.

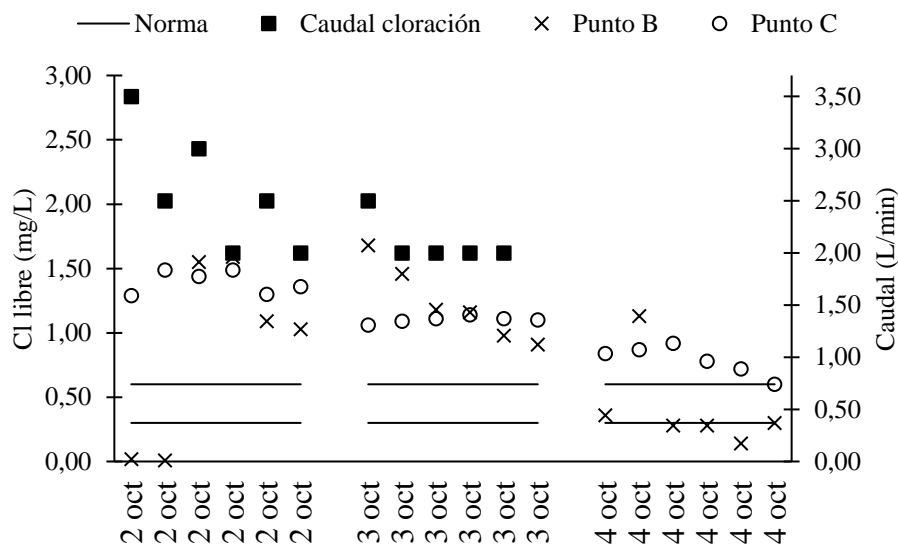


Figura 4.3 Dosificación de cloro libre con clorador Accu-Tab y flujómetro de 2,0 a 20,0 L/min, año 2019

La Figura 4.3 respalda la hipótesis de Barret (2019) al afirmar que se necesitaría la instalación de otro flujómetro con una graduación con escala entre los 0,0 y 5,0 L/min, por eso se instaló uno con escala entre 0,4 y 4,0 L/min. Usando dicho flujómetro, en la Figura 4.4, se observa que inicialmente, 16 y 17 de octubre, a la salida de los tanques de almacenamiento, Punto C, la concentración del cloro es mayor a la del tanque de mezcla, Punto B. Lo anterior, puede estar relacionado con un alto tiempo de contacto (9 horas) en los tanques y que la concentración del punto C corresponde a una cloración realizada el día antes o durante la noche anterior. A partir del 30 de octubre hasta el 1 de noviembre, se logró aumentar la concentración en el punto B y para el 1 de noviembre algunas mediciones del Punto C estuvieron dentro de lo esperado por la legislación local. Para el 5, 6 y 7 de noviembre, usando caudal cercano a 1,20L/min el valor del Punto B estuvo cercano al esperado de 1,25 mg/L, sin embargo, a la salida de los tanques el nivel de cloración estuvo por encima de 0,60 mg/L esperado. Así, el clorador Accu-Tab no permitió la dosificación que cumpliera con lo estipulado en la legislación, ya que fue común encontrar la concentración de cloro libre por debajo de los 0,30 mg/L o por encima de los 0,60 mg/L.

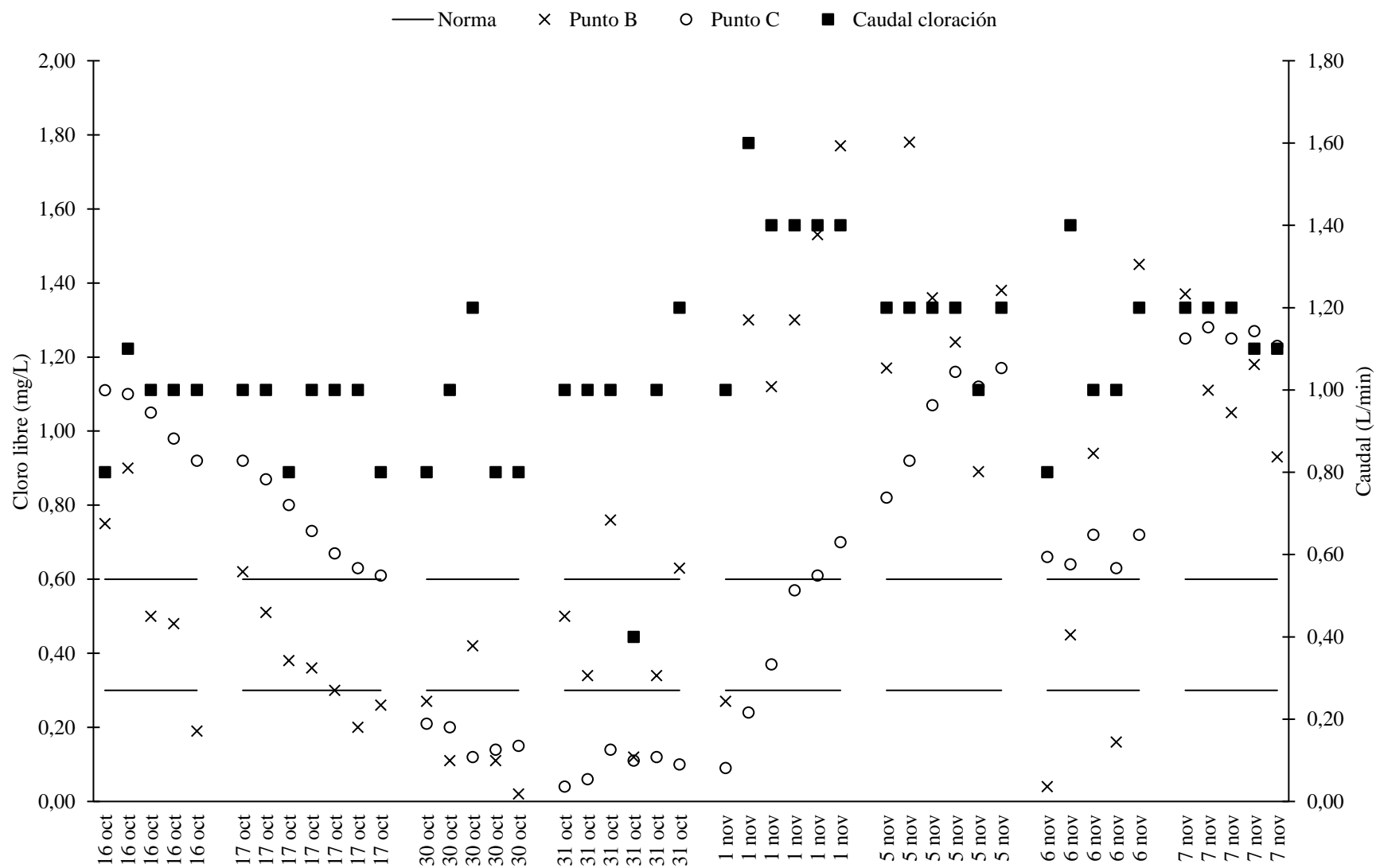


Figura 4.4 Dosificación de cloro libre con clorador Accu-Tab y flujómetro de 0,4 a 4,0 L/min, año 2019

4.1.2.3 Clorador Artesanal de cámara seca modificado

El siguiente clorador que se valoró fue el artesanal de cámara seca de la ASADA, con la incorporación de llaves de chorro y el flujómetro (Sección 3.1.4.3) y colocado sobre el tanque de premezcla. El clorador se instaló, 25 de noviembre de 2019, los datos que se recabaron para este clorador se pueden encontrar completos en los Apéndices 7 y 8 y la Figura 4.5. Como lo muestra la figura en mención, los caudales de cloración inferiores a 1,50 L/min, como el de los días 26 y 27, no permitieron una concentración de cloro libre, que cumpliera con el reglamento, en el Punto C. Sin embargo, el día 02 de diciembre hasta el día 04 del mismo mes se fijó el caudal de cloración entre 2,00 y 2,25 L/min y resultó satisfactorio, así que las siguientes mediciones se realizaron con ese caudal de cloración. Para el 17 al 20 de diciembre nuevamente, con el caudal de cloración en ese rango se obtuvieron valores apropiados a la salida del sistema. Se debe notar que los valores en el punto B muestran una concentración de cloro libre entre 0,80 y 1,00 mg/L, menor a 1,25 mg/L determinado en la demanda, lo que demuestra que la demanda de cloro en esa época había variado.

La Figura 4.5 también muestra que, a pesar de las variaciones en la concentración de cloro libre, a partir del día 2, la mayoría de las mediciones se mantuvieron dentro de los límites permitidos por la norma y las concentraciones que se salían del rango, lo hacían de manera moderada. Lo que se puede considerar aceptable, puesto que en la red de distribución se ve disminuida la concentración del agente desinfectante (Araya-Obando, 2012).

Con respecto al difusor de caudal (Figura 3.9), como muestra la Figura 4.6, inicialmente cumplió con su objetivo de distribuir con mayor uniformidad, el agua cruda sobre la pastilla, pero con el pasar de las horas y al desgastarse la pastilla, era común que en algunas ocasiones el artefacto se desacomodara y no cumpliera con su cometido. Se recomienda un estudio detallado para la implementación o no de dicho difusor.

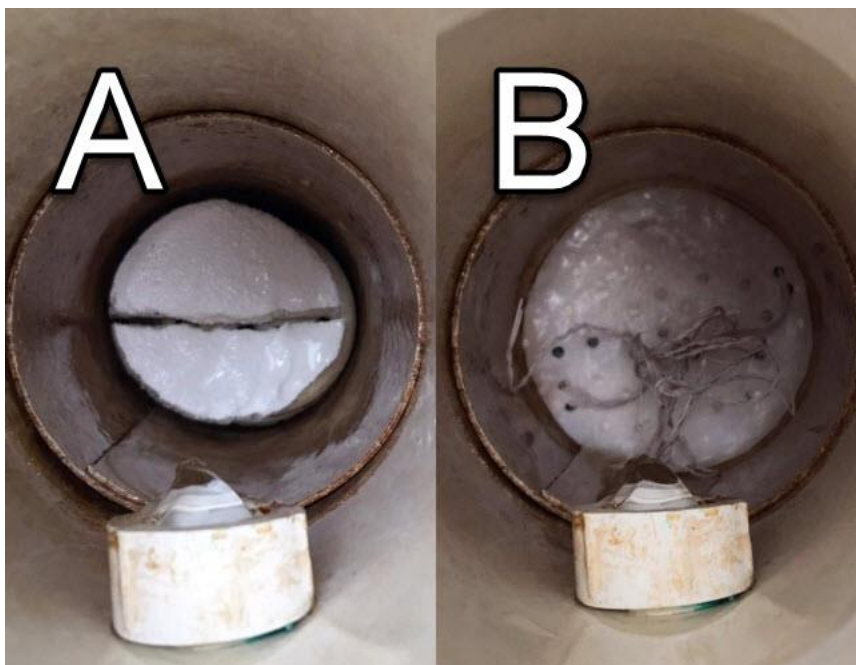


Figura 4.6 Implementación del difusor de agua cruda sobre la pastilla (A) sin difusor (B) con difusor

4.1.2.4 Clorador Artesanal de cámara húmeda desarrollado

Según se menciona en la Sección 3.1.4.4, se desarrolló un clorador artesanal de cámara húmeda y se colocó sobre el tanque de premezcla, sus resultados se muestran en la Figura 4.7 (los datos correspondientes a este clorador se encuentran en el Apéndice 9). El día 22 de enero, los niveles de cloro libre en todos los puntos de muestreo fueron bajos, llevando al incumplimiento de la norma en el Punto C. Por lo que se trató de estabilizar la concentración de cloro libre en los Punto A y B que tienen una respuesta inmediata a los cambios de dosis, antes de monitorear el Punto C, que requiere de varias horas para su estabilización.

Como el cloro libre no estuvo en los niveles adecuados, se le agregó otra pastilla, pero no presentó una diferencia significativa, porque las pastillas se alojaron al fondo del clorador y dejaron un espacio libre, por el que el agua cruda circuló sin hacer contacto con las pastillas

como lo muestra la Figura 4.8 (A). Como solución, cada pastilla se partió en cuatro partes y se depositaron en el clorador de forma que se propiciaran un lecho de pastillas, que obligara al agua cruda a atravesarlo Figura 4.8 (B), aumentó la superficie de contacto y propició una mejor cloración, como se puede ver en los datos del Apéndice 9, Cuadro A.9.1.

A partir del día 23 de enero (Figura 4.7), se forzó al sistema de cloración a alcanzar una concentración de cloro libre en el Punto B, comprendida entre 1,00 y 1,20 mg/L para ver el consumo de cloro durante el paso por los tanques de almacenamiento y medir lo que se obtenía en el Punto C. Así, el cloro empezó a normalizar su comportamiento, con algunas concentraciones dentro del rango permitido por la legislación, pero después del 24 la concentración sobrepasó los 0,60 mg/L, es importante resaltar que el caudal de cloración estuvo entre 3,0 y 4,0 L/min, para efectos de la prueba que se llevó a cabo. Lamentablemente, no se pudo evaluar el sistema a flujos menores porque en esas fechas se intensificó el problema con la pandemia.

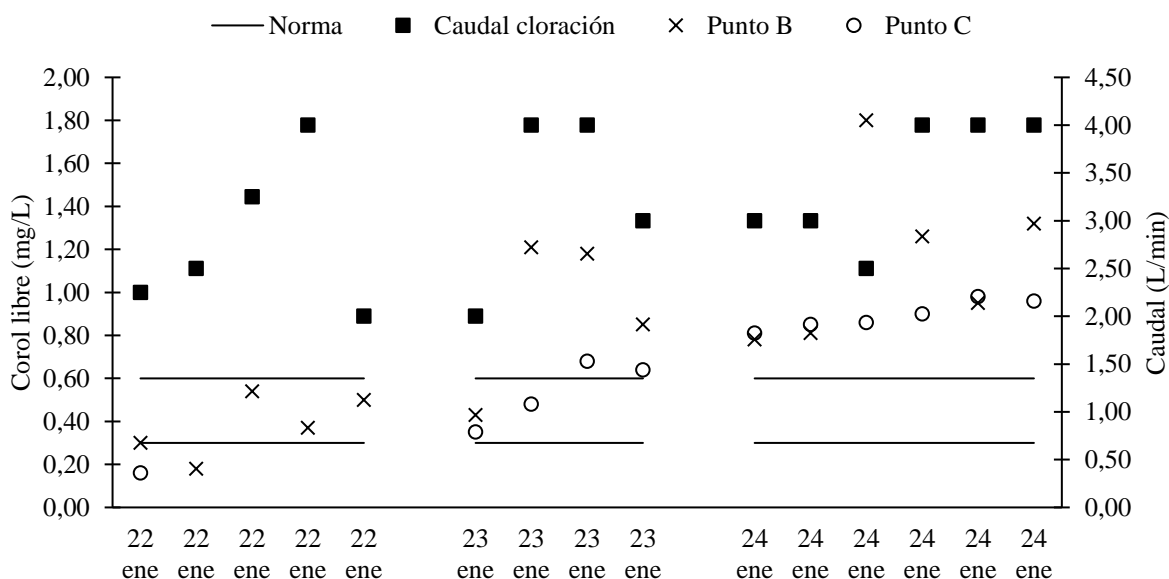


Figura 4.7 Dosificación de cloro libre con clorador artesanal de cámara húmeda y flujómetro de 0,4 a 4,0 L/min, año 2020

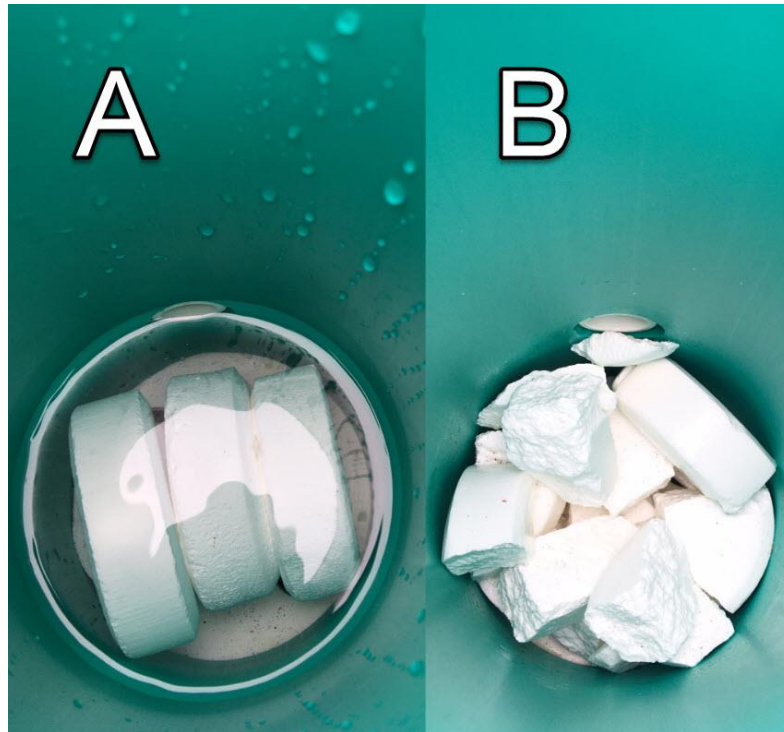


Figura 4.8 Colocación de las pastillas de ácido tricloroisocianúrico (A) enteras y (B) partidas

Durante los meses de julio a diciembre del año 2020, el señor José Cordero logró realizar una serie de mediciones del agua salida de los tanques de almacenamiento. Según la Figura 4.9 (datos en el Cuadro A.10.1 del Apéndice 10), la concentración de cloro libre estuvo entre el rango de los 0,30 a 0,60 mg/L, las que incumplieron, estuvieron por debajo de los 0,30 mg/L fijados por la legislación. Del total de los datos (87 mediciones), el 91% de las mediciones cumplieron con la norma. Se debe anotar que el flujómetro se descompuso y por tanto no se cuenta con los datos de caudal que hubieran permitido conocer mejor el funcionamiento del clorador. También, es importante anotar que el Sr. Cordero realizó todas las mediciones en las mañanas, entre las 6:00 y 9:00, por tanto, no sabemos si a lo largo del día varió la concentración, tal como se observó en los monitoreos discutidos en las secciones anteriores.

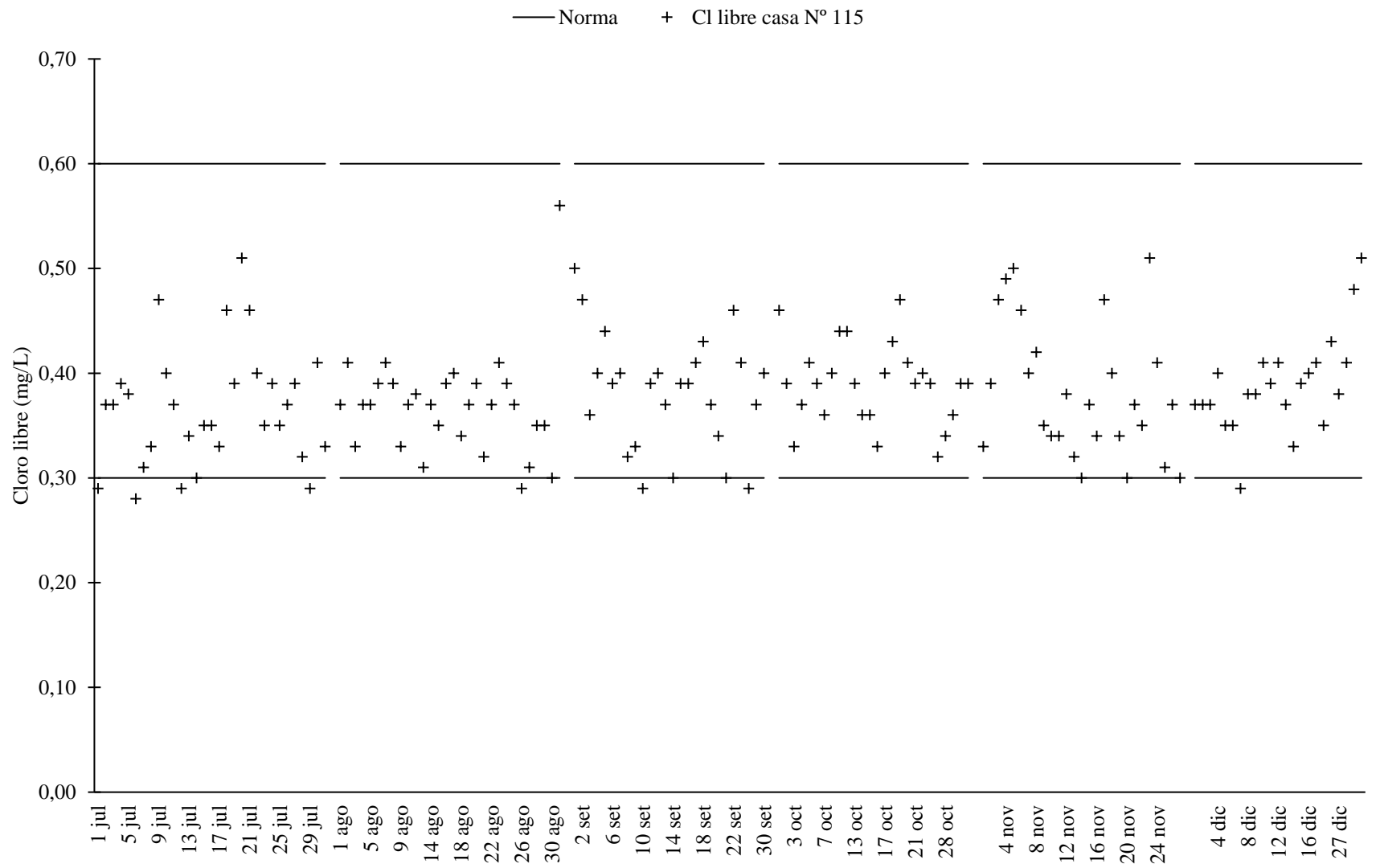


Figura 4.9 Dosificación de cloro libre con el clorador artesanal de cámara húmeda de julio a diciembre 2020

4.1.3 Efecto del caudal del sistema y el clorador en concentración del cloro en el agua tratada

En general, según los resultados en las secciones anteriores, controlar el nivel de cloración con cualquiera de los cloradores es bastante difícil. Primeramente, dependen de las variaciones en la calidad del agua, del tipo de pastilla, tipo de clorador y del flujo, tanto del agua a tratar como, la que ingresa al clorador. De las anteriores variables solamente la primera no se puede controlar. Por otro lado, para un mismo clorador y tipo de pastilla es de esperar que controlando el flujo de entrada al clorador se pueda controlar el nivel de cloro liberado. Por ejemplo, según Scott-Betcher (2004), las tabletas de hipoclorito de calcio Accu-Tab se erosionan a una velocidad predecible que depende del flujo de agua que entra al clorador, por lo tanto, se puede lograr una dosificación de cloro de alta precisión controlando el caudal. Lo anterior resulta ideal si el caudal de entrada a la planta fuera constante.

Sin embargo, en el caso de Cooperosales, tal como lo reportó Barret (2019) el 19 de marzo de 2019 usando un equipo ultrasónico, las variaciones del caudal fueron significativas y no hubo un caudal constante que permita una dosificación de cloro homogénea Figura 4.10 (A). El valor mínimo medido fue de 90,36 L/min, un máximo de 229,08 L/min y un valor promedio de $150,11 \pm 44,12$ L/min. La variación en los caudales se puede deber a eventos climáticos extremos, la pérdida de cobertura vegetal, la mala planificación urbana, mal uso de suelos, sistemas de irrigación ineficientes para cultivos e incluso fugas en el sistema (Bolaños-Portilla, Hurtado -Sánchez, & Restrepo-Tarquino, 2020). Durante el presente estudio los caudales de la Figura 4.10 (B) se determinaron de forma indirecta, a través de los caudales de cloración y concentración de cloro libre en los Puntos A y B (Sección 3.1.3.2.2), estos mostraron tendencias muy similares a las que registró Barret (2019). Por lo tanto, esto influyó de manera directa en la concentración de cloro, pues al no tener un caudal de cloración constante la concentración en el agua tratada varía con el caudal de agua que ingresa a la planta. Además, el caudal de cloración se ve influenciado por el flujo de entrada del agua cruda, pues el agua que pasa por el clorador es la misma agua cruda y si el flujo varía, también varía el del clorador haciendo que se mantuviera fluctuando la concentración de cloro dosificada. Sin embargo, no necesariamente en forma lineal. Para un mejor control del nivel de cloración se debería mantener un control del caudal de entrada al clorador en

función del flujo de agua a desinfectar. Además, se debería tener una forma de controlar la calidad de agua de entrada o el nivel de cloro a la salida del sistema, por ejemplo, con ORP, como se detalla en la siguiente sección.

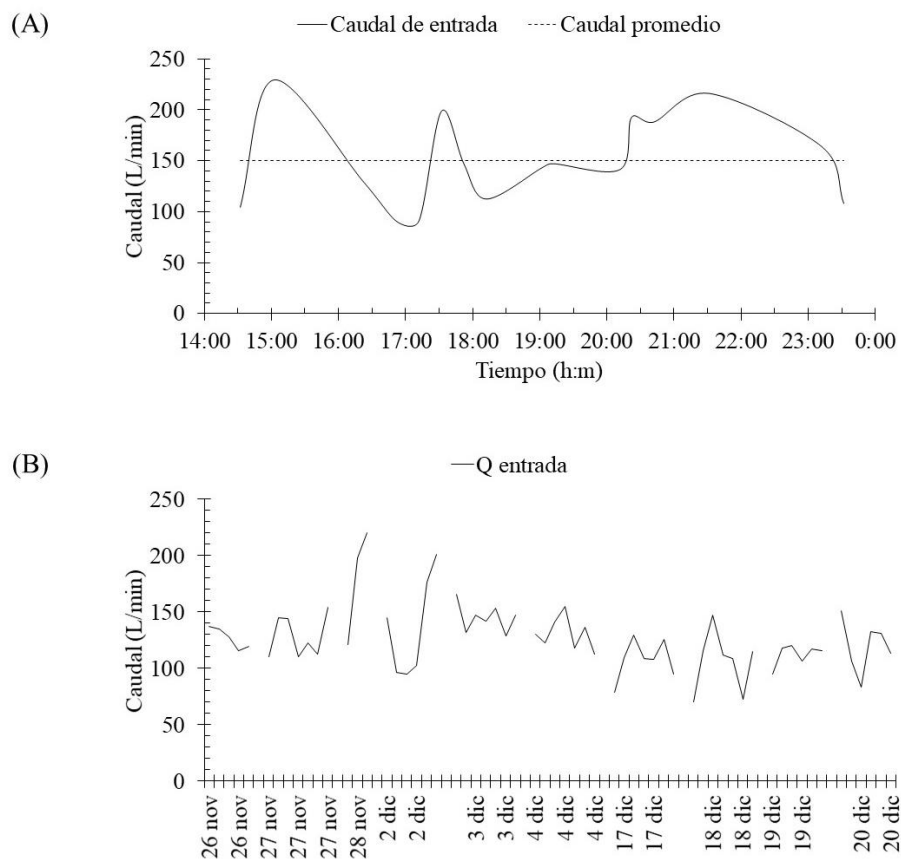


Figura 4.10 (A) Caudales medidos con equipo ultrasónico en la ASADA de Cooperosales (Barret, 2019) y (B) caudales teóricos del clorador artesanal de cámara seca modificado

4.2 CASO DE ESTUDIO: CENTRO COMERCIAL

4.2.1 Automatización del proceso de desinfección

Considerando que controlar un sistema de cloración basado en cloradores es difícil, en esta sección se evaluó un sistema automatizado con detección de cloro indirectamente por ORP. El sistema evaluado se localiza en un centro comercial y el electrodo de ORP a la salida del tanque de almacenamiento del agua, más detalles en la Sección 3.2.

En la Figura 4.11 se muestran los resultados obtenidos del monitoreo del proceso de desinfección automático, los datos se encuentran en los Cuadros A.11.1 y A.11.2 del Apéndice 11. Como lo muestra la Figura 4.11 (A), el potencial del set point del electrodo ORP se fijó en 650 mV tal como lo recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS) para garantizar una desinfección adecuada (Etienne, 2011). Inicialmente, a la salida del tanque de almacenamiento, el cloro libre, entre el 03 al 09 de noviembre, estuvo por encima de lo estipulado en la legislación en un 100% de las 7 muestras analizadas. Posteriormente, se estabilizó la concentración desde 16 al 29 del mismo mes, a excepción del día 18 que se sobre pasó la concentración máxima por 0,05 mg/L y el día 30 que llegó a alcanzar los 1,03 mg/L, lo cual representa que el 86% de las muestras cumplieron con la norma. Desde el día 23 hasta el 25 de noviembre, la concentración de cloro libre comenzó a bajar hasta aproximarse al límite inferior establecido, por lo que se tuvo que incrementar el set point a 700 mV y luego a 720 mV, en este último se alcanzó 1,03 mg/L. Lo anterior demuestra la necesidad de ajustar el ORP para obtener lecturas apropiadas de acuerdo a la legislación.

El Figura 4.11 (B) describe la dinámica de la desinfección para el mes de enero (los datos se encuentran en el Cuadro A.11.2 del Apéndice 11). De forma similar al mes de noviembre, se observa que los primeros días del mes se sobrepasó 0,60 mg/L, y solo algunas mediciones de ORP, estuvieron por debajo de la recomendación de los 650 mV. Del total de 13 muestras 5 (65%) estuvieron fuera de la legislación.

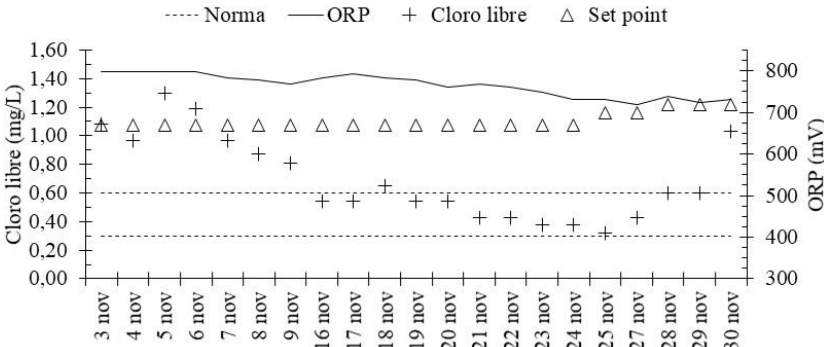
La inestabilidad del sistema pudo estar asociado en gran medida a variaciones en el pH. Dado que el ORP es vulnerable a cambios de pH (Maharjan et al., 2016). Además, según Steininger (1985) agentes desinfectantes con formas alcalinas como el hipoclorito de sodio usado en este caso, pueden aumentar el pH fácilmente, por lo que con estos agentes no se recomienda usarlos sin controlador de pH. Al cambiarse el pH del agua, varía su potencial, lo que obligaría al sistema a liberar más cloro, para llegar al set point que se fijó en el sistema, lo que podría estar causando que se sobre pasen los 0,6 mg/L. Por lo que es recomendable combinar el ORP con equipos que midan y regulen tanto el pH como la cantidad de desinfectante aplicado (Etienne, 2011).

En las mediciones se detectó que para un mismo set point se obtuvieron diferentes valores de cloro libre medido con DPD. Múltiples factores pueden generar diferencias o datos equivocados en las mediciones ORP. Algunos factores podrían ser la química redox de cada

sistema, la cinética lenta, las condiciones de los electrodos, contaminación de la sonda o la formación de precipitaciones, por lo que es importante la limpieza y mantenimiento de forma adecuada (Copeland & Lytle, 2014; James et al., 2004) y así reducir diferencias o errores. Para Steininger (1998) los efectos de la contaminación del sensor, pueden acarrear desacuerdos entre lo medido por los kit de prueba y el ORP.

Finalmente, se debe aclarar que el agua del Centro Comercial es previamente desinfectada con cloro por el proveedor del servicio y reclorada con el sistema estudiado. Por tanto, cualquier cambio brusco de sobre cloración por parte del proveedor pudo afectar directamente el sistema, pudiendo incluso saturar temporalmente los sensores de ORP (Suslow, 2004). No obstante, el sistema logró controlar el nivel de cloración a la salida de los tanques de almacenamiento durante la mayor parte de las mediciones realizadas.

(A)



(B)

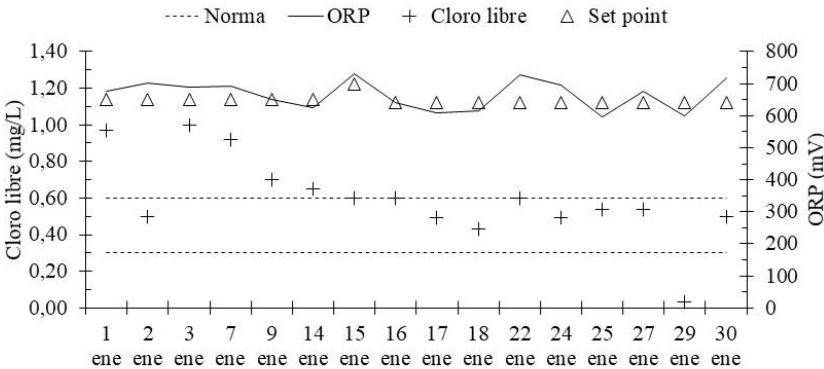


Figura 4.11 Datos de dosificación de cloro libre controlada por sistema ORP para los meses de (A) noviembre 2020, (B) enero 2021

4.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS POR CAMBIOS EN LA LEGISLACIÓN

La mayoría de los datos que se discutieron en las secciones anteriores se midieron antes del 18 de diciembre de 2020, por lo que no se vieron afectados por el cambio que supuso el Decreto Ejecutivo que reformó los límites de cloro libre residual y los fijó entre los 0,30 y 1,00 mg/L por un periodo de seis meses. A continuación, se presenta un análisis que compara la concentración de cloro libre a la luz de los rangos para el cloro libre residual de 0,3-0,6 mg/L y 0,3-1,0 mg/L en el agua a la salida de los tanques, en el Punto C.

La Figura 4.12 muestra que el cumplimiento de la norma para clorador artesanal de cámara seca, en 9 muestras evaluadas, se mantuvo igual en ambos rangos, por tanto, no aumentó el porcentaje de cumplimiento con los cambios en la norma.

Para los cloradores Accu-Tab y el artesanal de cámara seca modificado, hubo un aumento en el porcentaje de cumplimiento de la norma, donde el Accu-Tab pasó de un 6% a un 44%, mientras que el artesanal, pasó de un 44% a un 75% (Figura 4.12). Para el clorador Accu-Tab se contó con un total de 70 mediciones y para el clorador artesanal de cámara seca modificado, 69 mediciones.

En cuanto al clorador artesanal de cámara húmeda, el porcentaje de cumplimiento en los niveles de cloro libre residual, fue significativo, ya que pasó de un 18% a un 91%. En cuanto a los datos aportados por el Sr. José Cordero para el mismo clorador, no tuvieron variación alguna con los cambios en la norma, ya que el porcentaje de cumplimiento se mantuvo en el 95%. Los porcentajes de obtuvieron a partir de una muestra de 11 mediciones, mientras que el Sr. José Cordero aportó un total de 163 mediciones.

Con respecto al centro comercial, que realizó su desinfección mediante la tecnología ORP, también hubo un incremento muy importante en el porcentaje de cumplimiento de la norma, al pasar de un 59% a un 86%. Los porcentajes de obtuvieron a partir de una muestra de 37 mediciones.

En términos generales la modificación de la norma vino a contribuir con el cumplimiento de la norma en el caso de darse una sobre cloración, es decir, cuando la dosis se excedía de los 0,60 mg/L. Además, al tener un mayor rango de trabajo se evita tener que manipular en exceso los cloradores para alcanzar los valores de la norma y consecuentemente hay menos riesgo de salirse del rango permitido por errores en la manipulación.

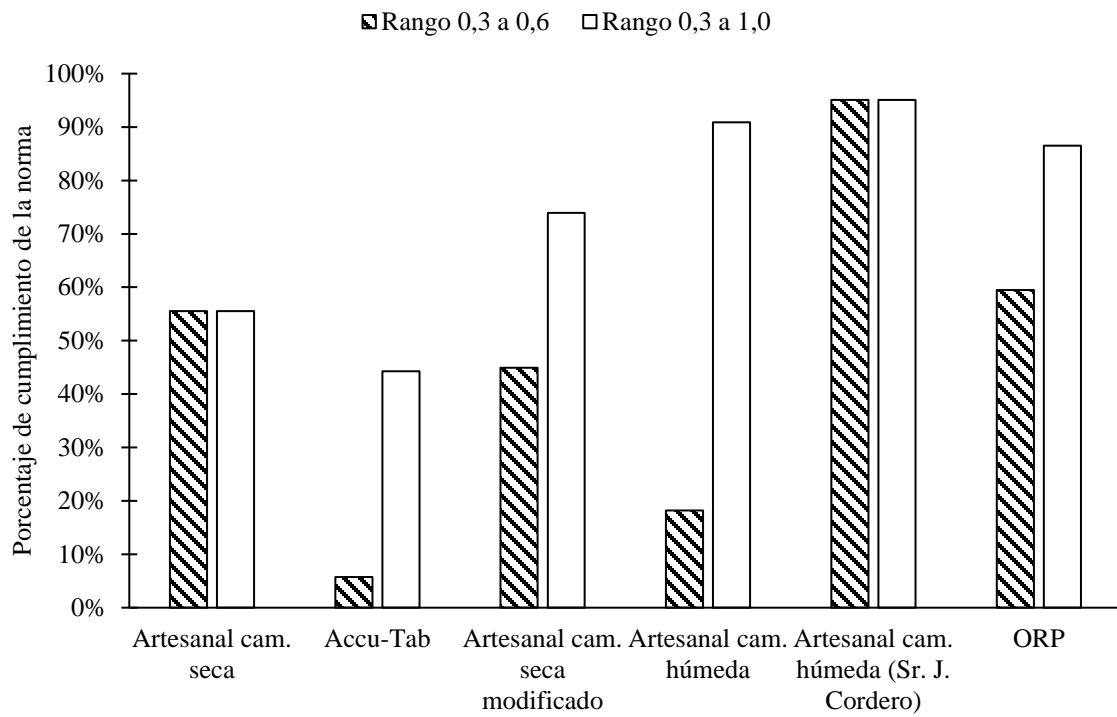


Figura 4.12 Porcentaje de cumplimiento de las mediciones de cloro libre residual estipulados en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (N° 38924-S)

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La determinación de la demanda de cloro es valiosa como una primera aproximación para ajustar la dosificación, pero dado que las condiciones del agua cruda varían con el tiempo su aplicación diaria no es recomendable.

La implementación de un tanque de premezcla permite una mejor distribución del cloro dosificado y que toda el agua tratada, dependiendo de la distribución de los tanques de almacenamiento, posea un tiempo de contacto similar.

En todos los cloradores evaluados se presentaron dificultades para controlar el nivel de dosificación. La implementación de un medidor de caudal de cloración resultó importante para tener un mejor control. No obstante, el controlar el flujo de cloración de forma manual es complicado, especialmente si el flujo del agua a tratar es variable como sucede en la mayoría de los acueductos.

El clorador de cámara húmeda desarrollado parece prometedor, aunque los datos obtenidos por varios meses fueron tomados a la misma hora, por tanto, no se puede garantizar que a lo largo de 24 horas no se den variaciones en el nivel de cloro en el agua a distribuir.

Para el sistema automatizado presente en el centro comercial, se logró determinar que el set point que brindó la dosificación más acertada, estuvo comprendido entre los 670 y 700 mV, aunque algunas de las concentraciones de cloro libre medidas superaron el límite máximo de la norma (los 0,60 mg/L), esto se puede deber al pH. Pero tomando en cuenta la modificación a la norma con vigencia de seis meses, el sistema logró cumplir en un 86% de las mediciones.

5.2 RECOMENDACIONES

Para cualquier tipo de clorador por pastillas se recomienda evaluar un sistema que controle el caudal de cloración y consecuentemente se pueda controlar la cantidad de cloro dosificado al agua a desinfectar.

Se recomienda evaluar el uso de un electrodo de ORP que, según el nivel de cloro a la salida de los tanques de almacenamiento, controle una válvula solenoide que abra y cierre el agua a la entrada al clorador. Otra opción es colocar un medidor de flujo del agua cruda y

que al momento de aumentar el caudal el mismo mande una señal a la válvula solenoide que nuevamente abra o cierre la entrada de agua al clorador. En esta última opción se asume una calidad de agua constante. Cualquiera de estas opciones debe ser ampliamente estudiadas a nivel experimental antes de instalarlas de forma permanente en un sistema de potabilización.

En las ASADAS sería muy acertado colocar instrumentos para la cuantificación del agua que entra al sistema, así como el agua que sale por rebalse y la que se dirige hacia la red de distribución.

Aplicar un plan de monitoreo en el centro comercial que permita conocer la concentración de cloro libre presente en el agua suministrada por el proveedor, antes de ingresar al sistema automatizado, para evitar dosificaciones que incumplan con la legislación.

En sistemas de control mediante ORP, además del cloro libre, es apropiado medir el pH del agua que ingresa al sistema, para determinar si es necesario un equipo regulador de pH para evitar su afectación en la desinfección y la dosificación.

En estos sistemas, es importante implementar un sistema de monitoreo y limpieza de los electrodos de ORP a utilizar con el fin de evitar errores por mal funcionamiento de los equipos.

El sistema por dosificación con cloro líquido y control por medio de ORP se presenta más robusto que el sistema de pastillas. Sin embargo, en ambos casos se recomienda un monitoreo más constante por parte de los operadores. Si el muestreo es diario, al menos tomar las muestras a distintas horas para detectar si hay variaciones importantes en la calidad durante el día.

Los cambios en la norma que permiten tener la concentración de cloro libre entre 0,30 y 1,00 mg/L, por un periodo de seis meses, tuvieron un impacto positivo sobre el cumplimiento de la misma, por lo que se recomienda que los cambios efectuados en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto N° 38 924-S), se mantengan de forma permanente.

6 REFERENCIAS

- Amjad, H., Hashmi, I., Saif-Ur-Rehman, M., Awan, M. A., Ghaffar, S., & Khan, Z. (2013). Cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in urban drinking water supplies of Pakistan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 91, 25–31.
- Amoedo-Cabaleiro, F. (2005). *Estudio cinético de las reacciones de formación de n-cloro compuestos derivados de heterociclos de cinco miembros y de las reacciones de la n-cloro-2-oxazolidona con diversos iones*. Universidade de de Santiago de Compostela.
- Araya-Obando, J. A. (2012). *Modelación del cloro residual en la red de distribución del Acueducto La Sirena, Cali*. Universidad del Valle.
- Arboleda-Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Arellano-Hartig, F., Garita-Incer, A., González-Jiménez, A., García-Fernández, R., Quesada-Rodríguez, J., Villalobos-Jiménez, A., ... Muñoz-Jiménez, R. (2019). Diagnóstico Nacional de Entes Operadores (Levantamiento 2017-2020). *Licitación Pública Nacional N° 2016LN-000020-PRI*.
- Barret, C. (2019). *Determination of variables influencing the effectiveness of disinfection of surface water used for human consumption in Costa Rica*. École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Betcher, S. (2004). Calcium hypochlorite tablet chlorination: Fact or fiction? *Journal of the New England Water Works Association*, 118(3), 166–170.
- Bolaños-Alfaro, J. D. (2013). Implicaciones del monitoreo periódico de la calidad del agua potable en el cantón de Grecia, Alajuela, Costa Rica. *Intersedes*, 14(28), 39–53.
- Bolaños-Portilla, I. C., Hurtado-Sánchez, I. C., & Restrepo-Tarquino, I. (2020). Diffuse cognitive maps for analysis of vulnerability to climate variability in Andean rural micro-watersheds. *Revista DYNA*, 87(212), 38–46.
- Bower, K. M. (2014). Water supply and sanitation of Costa Rica. *Environ Earth Sci*, 71, 107–123.
- Capodaglio, A. G., & Callegari, A. (2009). Online monitoring technologies for drinking water systems security. In P. Hlavinek, C. Popovska, J. Marsalek, I. Mahrikova, & T. Kukharchyk (Eds.), *Risk Management of Water Supply and Sanitation Systems* (pp.

- 153–179). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Chaves, R. S., Guerreiro, C. S., Cardoso, V. V, Benoiel, M. J., & Santos, M. M. (2019). Comparative Biochemistry and Physiology , Part C Hazard and mode of action of disinfection by-products (DBPs) in water for human consumption : Evidences and research priorities. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 223(December 2018), 53–61.
- Cheremisinoff, N. P. (2002). Chapter I: An Overview of Water and Waste-water treatment. In N. P. Cheremisinoff (Ed.), *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies* (pp. 1–61). Butterworth-Heinemann.
- Chernicharo, C. A. L. (2017). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. *FINEP/PROSAB*, 544.
- Clark, R. M. (1998). Chlorine Demand and TTHM Formation Kinetics: A Second-Order Model. *Journal of Environmental Engineering*, 124(1), 16–24.
- Clasen, T., & Edmondson, P. (2006). Sodium dichloroisocyanurate (NaDCC) tablets as an alternative to sodium hypochlorite for the routine treatment of drinking water at the household level. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209(2), 173–181.
- Copeland, A., & Lytle, D. A. (2014). Measuring the oxidation – reduction potential of important oxidants in drinking water. *Journal - American Water Works Association*, 106(1), 10–20.
- Cortés, C., & Marcos, R. (2018). Mutat Res Gen Tox En Genotoxicity of disinfection byproducts and disinfected waters : A review of recent literature. *Mutat Res Gen Tox En*, 831(December 2017), 1–12.
- Daniel, L. A. (2001). *Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável*. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB.
- Demarini, D. M. (2020). A Review on the 40th Anniversary of the First Regulation of Drinking Water Disinfection By-products. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 61(6), 588–601.
- Dong, S., Massalha, N., Plewa, M. J., & Nguyen, T. H. (2017). Toxicity of wastewater with elevated bromide and iodide after chlorination , chloramination , or ozonation disinfection Toxicity of wastewater with elevated bromide and iodide after chlorination

- , chloramination, or ozonation disinfection. *Environ. Sci. Technol.*, 51(16), 9297–9304.
- Etienne, G. (2011). *The Water Expert*. Xlibris.
- Faust, S. D., & Aly, O. M. (1998). *Chemistry of water treatment* (CRC Press). Taylor & Francis Group.
- Galster, H. (2000). Technique of Measurement, Electrode Processes and Electrode Treatment. In J. Schüring, H. D. Schulz, W. R. Fisher, J. Böttche, & W. H. M. Duijnisveld (Eds.), *Redox: Fundamentals, Processes and Applications* (pp. 13–23). Berlin, Heidelberg: Springer.
- González-Vargas, A. (2011). *Desinfección del agua, mediante el uso del ácido tricloroisocianúrico*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Gray, N. F. (2008). *Drinking Water Quality: Problems and solutions* (Second). Cambridge University Press.
- Han, J., & Zhang, X. (2018). Evaluating the Comparative Toxicity of DBP Mixtures from Different Disinfection Scenarios: A New Approach by Combining Freeze-Drying or Rotoevaporation with a Marine Polychaete Bioassay. *Environ. Sci. Technol.*, 52, 10552–10561.
- Huangfu, C., Zhang, Y., Jang, M., & Feng, L. (2019). A μ PAD for simultaneous monitoring of Cu^{2+} , Fe^{2+} and free chlorine in drinking water. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 293(November 2018), 350–356.
- Ibarguen-Castañeda, M., & Bernal-Mejía, L. (2008). *Establecer la demanda de cloro en el Acueducto Tribunas Córcega de la Ciudad de Pereira*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Imprenta Nacional. (2020). Decreto N° 42332-S. *La Gaceta*, 296, 1–28.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2011). *Censo 2011*. San José, Costa Rica.
- James, C. N., Copeland, R. C., & Lytle, D. A. (2004). Relationships between Oxidation-Reduction Potential, Oxidant, and pH in Drinking Water. In *Proc. 2004 AWWA WQTC*. San Antonio, Texas.
- José, S., & Rebelo, H. (2017). Disinfection of drinking water. In A. Cardoso, C. Martins-Almeida, T. Costa-Cordeiro, & V. Gaffney (Eds.), *Disinfectants: Properties, Applications and Effectiveness* (pp. 201–227). Nova Science Publishers, Inc.
- Kabir, H., Ma, P. Y., Renn, N., Nicholas, N. W., & Cheng, I. F. (2019). *Talanta*

- Electrochemical determination of free chlorine on pseudo-graphite electrode. *Talanta*, 205(May), 120101.
- Kavi-Priya, S., Shenbagalakshmi, G., & Revathi, T. (2020). Applied fuzzy heuristics for automation of hygienic drinking water supply system using wireless sensor networks. *The Journal of Supercomputing*, 76(6), 4349–4375.
- Kizilaslan, M. A., Demirel, E., & Aral, M. (2019). Efficiency Enhancement of Chlorine Contact Tanks in Water Treatment Plants : A Full-Scale Application. *Processes*, 7(9).
- Köhler, A. T., Rodloff, A. C., Labahn, M., Reinhardt, M., Truyen, U., & Speck, S. (2018). Efficacy of sodium hypochlorite against multidrug-resistant Gram-negative bacteria. *Journal of Hospital Infection*, 100(3), 40–46.
- Kroehler, C. J. (2014). Potable Water Quality Standards and Regulations: A Historical and World Overview. In T. Younos & C. A. Grady (Eds.), *Potable Water: Emerging Global Problems and Solutions* (pp. 1–36). Springer.
- Kujlu, R., Mahdavianpour, M., & Ghanbari, F. (2020). Multi-route human health risk assessment from trihalomethanes in drinking and non-drinking water in Abadan, Iran. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(34), 42621–42630.
- Kunz, S., Romero-Esquivel, L. G., Otter, P., Feistel, U., Grischek, T., Valverde-Cerdas, J., & Feller, J. (2017). Treatment of arsenic-contaminated water using in-line electrolysis, co-precipitation and filtration in Costa Rica. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1), 40–48.
- López, P. (2001). *Prácticas de Laboratorio Química Sanitaria II. Manual Teórico Práctico*. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Maharjan, P., Clark, T., Kuenzel, C., Foy, M. K., & Watkins, S. (2016). On farm monitoring of the impact of water system sanitation on microbial levels in broiler house water supplies. *Journal of Applied Poultry Research*, 25(2), 266–271.
- Metcalf & Eddy. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2018). *Costa Rica: Agua y Saneamiento 2030, análisis relacionado con los ODS*. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Salud. (2020). *Reglamento de Calidad del Agua Potable N° 38924*. San José, Costa Rica.

- Mohammed, A. N. (2019). Resistance of bacterial pathogens to calcium hypochlorite disinfectant and evaluation of the usability of treated filter paper impregnated with nanosilver composite for drinking water purification. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, *16*, 28–35.
- Mora-Castro, S. (2011). *Evaluación de las principales tecnologías utilizadas en Costa Rica para la desinfección del agua*. Universidad de Costa Rica.
- Newman, S. E. (2004). Disinfecting irrigation water for disease management. *In 20th Annual Conference on Pest Management on Ornamentals*, *970*, 1–10.
- Pan, Y., & Zhang, X. (2013). Four groups of new aromatic halogenated disinfection byproducts: effect of bromide concentration on their formation and speciation in chlorinated drinking water. *Environ. Sci. Technol.*, *47*, 1265–1273.
- Patil, R., Ahmad, D., Balkundae, P., Kausley, S., & Malhotra, C. (2020). Development of low cost point-of-use (POU) interventions for instant decontamination of drinking water in developing countries. *Journal of Water Process Engineering*, *37*, 101435.
- Pichel, N., Vivar, M., & Fuentes, M. (2019). The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. *Chemosphere*, *218*, 1014–1030.
- Pinto, G., & Rohrig, B. (2003). Use of Chloroisocyanurates for Disinfection of Water: Application of Miscellaneous General Chemistry Topics. *Journal of Chemical Education*, *80*(1), 41–44.
- Pizzi, N. G. (2011). *Water Treatment Operator Handbook*. American Water Works Association.
- Plewa, M. J., Wagner, E. D., & Richardson, S. D. (2017). TIC-Tox: A preliminary discussion on identifying the forcing agents of DBP-mediated toxicity of disinfected water. *Journal of Environmental Sciences*, 208–216.
- PNUD Costa Rica. (2019). Tutorial sobre cómo armar un clorador para acueductos comunales. Retrieved November 23, 2019, from <https://www.youtube.com/watch?v=wsME23siy5U>
- PPG Industries. (2009). Sistema Accu-Tab ®: Cosecha y Envasado de alimentos. Retrieved June 9, 2021, from https://accu-tab.com/Portals/0/pdfs/Accu-Tab_FoodPacking_CapBrochure_Spanish.pdf

- Pradana-Pérez, J. A., & García-Avilés, J. (2019). *Criterios de calidad y gestión del agua potable*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- PurAqua Products. (2009). Instruction Manual for 3000 Series Chlorinators. Retrieved from https://www.puraquaproducts.com/product-documents/3000Series_Manual.pdf
- Quartaroli, L., Cardoso, B. H., Ribeiro, G. D. P., & Ribeiro-da-Silva, G. H. (2018). Wastewater Chlorination for Reuse , an Alternative for Small Communities, (December), 1–6.
- Ritter, J. (2010). *Water Quality: Principles and Practices of Water Supply Operations* (4th ed.). American Public Health Association.
- Romanovski, V., Claesson, P. M., & Hedberg, Y. S. (2020). Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12704–12716.
- Romero-Esquivel, L. G., Gamboa-Jiménez, A., Barrantes-Jiménez, K., Salas-Jiménez, P., Mora-Campos, D., Pino-Gómez, M., ... Silva, B. (2021). Determinación de las variables de influencia que afectan la eficiencia de la desinfección en aguas superficiales utilizadas para consumo humano en Costa Rica.
- Rudra, N. (2011). Openness and the Politics of Potable Water. *Comparative Political Studies*, 44(1), 771–803.
- Sawyer, C., McCarty, P., & Parkin, G. (2003). *Chemistry for Environmental Engineering and Science* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Schneider, M., & Bláha, L. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of cyanobacterial toxins from drinking water. *Environmental Sciences Europe*.
- Shamrukh, M., & Abdel-Lah, A. K. (2006). Chlorination of Nile drinking water, upper Egypt. *Journal of Engineering and Applied Science*, 53(3), 323–338.
- Spellman, F. R. (2020). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (4th editio). Boca Raton: CRC Press.
- Srivastav, A. L., Patel, N., & Chaudhary, V. K. (2020). Disinfection by-products in drinking water: Occurrence, toxicity and abatement. *Environmental Pollution*, 267, 115474.
- Stefán, D., Erdélyi, N., Izsák, B., Záray, G., & Vargha, M. (2019). Formation of chlorination by-products in drinking water treatment plants using breakpoint chlorination. *Microchemical Journal*, 149(June), 104008.

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104008>

- Steininger, J. M. (1985). PPM or ORP: Which Should Be Used? *Swimming Pool Age & Spa Merchandiser*.
- Steininger, J. M. (1990). ORP testing and chemical automation for swimming pools and spas. *Santa Barbara Control Systems*.
- Steininger, J. M. (1998). Orp control in pools and spas. *Chemtrol Automatic Controllers for Water Treatment in Pools, Spas and Cooling Towers*, 3–6.
- Suslow, T. V. (2004). Oxidation-Reduction Potential (ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation.
- Tilstam, U., & Weinmann, H. (2002). Trichloroisocyanuric Acid: A Safe and Efficient Oxidant. *Organic Process Research & Development*, 6, 384–393.
- Turner, R. (2019). Drinking Water Disinfection - A History and Improved Monitoring Techniques. *Journal of the New England Water Works Association*, 132(2), 83–90.
- Vargas, L., Barrenechea-Martel, A., Aurazo-Zumaeta, M., & Maldonado-Yactayo, V. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. *CEPIS/OPS*, 1.
- Wahman, D. G., & Alexander, M. T. (2019). A Drinking Water Relevant Water Chemistry Model for the Free Chlorine and Cyanuric Acid System from 5°C to 35°C. *Environmental Engineering Science*, 36(3), 283–294.
- Wang, T. X., & Margerum, D. W. (1994). Kinetics of Reversible Chlorine Hydrolysis: Temperature Dependence and General-Acid/Base-Assisted Mechanisms. *Inorg. Chem.*, 33(6), 1050–1055.
- White, G. C. (2010). *White's handbook of chlorination and alternative disinfectants* (5th ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.
- World Health Organization. (1997). *Guidelines for drinking-water quality* (Vol. 3).
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality*.
- World Health Organization. (2019). Drinking-water. Retrieved September 5, 2019, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Yang, M., & Zhang, X. (2016). Trends in Environmental Analytical Chemistry Current trends in the analysis and identification of emerging disinfection byproducts. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 10, 24–34.

APÉNDICES

APÉNDICE 1: FOTOGRAFÍAS DE LA ASADA DE COOPEROSALES



Figura A.1.1 Punto de muestreo A



Figura A.1.2 Punto de muestreo B



Figura A.1.3 Punto de muestreo C



Figura A.1.4 Clorador artesanal de cámara seca



Figura A.1.5 Clorador Accu-Tab



Figura A.1.6 Clorador artesanal de cámara seca modificado



Figura A.1.7 Clorador artesanal de cámara húmeda



Figura A.1.8 Tanques de almacenamiento, estructura metálica sobre la que estaba instalado el clorador artesanal de cámara seca y sus tuberías de distribución entre 3/4 tanques

**APÉNDICE 2: DOSIFICACIÓN DE LA DISOLUCIÓN MADRE (100 PPM)
PARA ANALISIS DE CURVA DE DEMANDA DE CLORO**

Cuadro A.2.1 Dosis de la disolución madre de cloro para la curva de demanda de cloro

N° de Beaker	Volumen de la dln madre de 100,0 ppm (mL)	Concentración de cloro inicial (mg/L)
1	0,15	0,30
2	0,20	0,40
3	0,23	0,45
4	0,25	0,50
5	0,28	0,55
6	0,30	0,60
7	0,33	0,65
8	0,35	0,70
9	0,40	0,79
10	0,45	0,89
11	0,50	0,99
12	0,55	1,09
13	0,60	1,19
Blanco	0,60	1,19

APÉNDICE 3: RESULTADOS DE LA DEMANDA DE CLORO

Cuadro A.3.1 Resultados obtenidos para la curva de demanda de cloro

N° de Beaker	Volumen de dn madre 100,0 ppm (mL)	Vol. Muestra (mL)	Concentración de cloro inicial (mg/L)	Cloro libre (mg/L)
1	0,15	50,00	0,30	0,08
2	0,20	50,00	0,40	0,14
3	0,23	50,00	0,45	0,21
4	0,25	50,00	0,50	0,23
5	0,28	50,00	0,55	0,31
6	0,30	50,00	0,60	0,41
7	0,33	50,00	0,65	0,24
8	0,35	50,00	0,70	0,44
9	0,40	50,00	0,79	0,65
10	0,45	50,00	0,89	0,56
11	0,50	50,00	0,99	0,79
12	0,55	50,00	1,09	0,73
13	0,60	50,00	1,19	0,85
Blanco	0,60	50,00	1,19	1,00

APÉNDICE 4: DATOS CLORO LIBRE DEL CLORADOR ARTESANAL DE CÁMARA SECA, ASADA COOPEROSALES

Cuadro A.4.1 Medición de cloro libre al clorador artesanal de cámara seca (06/09/2019)

Hora	Punto D (mg/L)
8:30	23,00
9:30	19,00
10:30	41,00
12:30	35,00
13:30	33,00
14:30	30,00

Cuadro A.4.2 Medición de cloro libre al clorador artesanal de cámara seca (30/09/2019)

Hora	Punto C (mg/L)	Punto D (mg/L)
8:00	0,34	53,00
9:00	0,37	45,00
10:00	0,45	45,00
11:00	0,35	47,00
12:00	0,26	49,00
13:00	0,26	90,00
14:00	0,21	97,00
15:00	0,19	131,00
16:00	0,52	131,00

APÉNDICE 5: DATOS DEL CLORADOR ACCU-TAB, CON CAUDAL MENOR A 1,0 L/MIN

Cuadro A.5.1 Prueba del clorador Accu-Tab con caudal inferior al recomendado

Hora	Caudal (L/min)	Cloro libre en A (mg/L)	Cloro libre en B (mg/L)	Cloro libre en C (mg/L)
10:30	1,0	118,00	0,65	0,78
11:00	0,8	31,00	0,15	
11:30	0,8	22,00	0,07	
12:00	0,8	8,00	0,02	0,65
12:30	0,8	9,00	0,03	
13:00	0,6	7,00	0,02	
14:00	1,0	160,00	1,35	0,65
15:00	1,0	157,00	1,38	0,58

APÉNDICE 6: DATOS RECABADOS PARA EL CLORADOR ACCU TAB

Cuadro A.6.1 Datos para el clorador Accu Tab con el flujómetro de 2,00 a 20,00 L/min

Fecha	Hora	Caudal de cloración (L/min)	Cloro libre en A (mg/L)	Cloro libre en B (mg/L)	Cloro libre en C (mg/L)
1/10/2019	11:00	2,5	85,00	0,02	0,65
	12:00	-	88,00	0,02	
	13:00	-	104,00	0,01	
	14:00	-	102,00	0,01	1,01
	15:00	-	105,00	0,01	
	16:00	3,0	62,00	0,01	1,22
2/10/2019	8:00	3,5	109,00	0,02	1,29
	9:30	2,5	75,00	0,01	1,49
	11:00	3,0	63,00	1,55	1,44
	12:30	2,0	57,00	1,59	1,49
	14:00	2,5	61,00	1,09	1,30
	15:30	2,0	57,00	1,30	1,36
3/10/2019	8:00	2,5	111,00	1,68	1,06
	9:30	2,0	82,00	1,46	1,09
	11:00	2,0	86,00	1,18	1,11
	12:30	2,0	76,00	1,16	1,14
	14:00	2,0	70,00	0,98	1,11
	15:30	-	122,00	0,91	1,10
4/10/2019	8:00	-	73,00	0,36	0,84
	9:30	-	86,00	1,13	0,87
	11:00	-	25,00	0,28	0,92
	12:30	-	50,00	0,28	0,78
	14:00	-	29,00	0,14	0,72
	15:30	-	39,00	0,30	0,60

Cuadro A.6.2 Datos para el clorador Accu Tab con el flujómetro de 0,4 a 4,0 L/min

Fecha	Hora	Caudal de cloración (L/min)	Cloro libre en A (mg/L)	Cloro libre en B (mg/L)	Cloro libre en C (mg/L)
16/10/2019	9:30	0,8	123,00	0,75	1,11
	11:00	1,1	120,00	0,90	1,10
	12:30	1,0	121,00	0,50	1,05
	14:00	1,0	81,00	0,48	0,98
	15:30	1,0	29,00	0,19	0,92
17/10/2019	8:00	1,0	82,00	0,62	0,92
	9:30	1,0	76,00	0,51	0,87
	11:00	0,8	62,00	0,38	0,80
	12:30	1,0	51,00	0,36	0,73
	14:00	1,0	47,00	0,30	0,67
	15:30	1,0	38,00	0,20	0,63
	16:30	0,8	40,00	0,26	0,61
30/10/2019	9:30	0,8	54,00	0,27	0,21
	11:00	1,0	12,00	0,11	0,20
	12:30	1,2	220,00	0,42	0,12
	14:00	0,8	123,00	0,11	0,14
	15:30	0,8	44,00	0,02	0,15
31/10/2019	8:00	1,0	89,00	0,50	0,04
	9:30	1,0	76,00	0,34	0,06
	11:00	1,0	144,00	0,76	0,14
	12:30	0,4	43,00	0,12	0,11
	14:00	1,0	63,00	0,34	0,12
	15:30	1,2	90,00	0,63	0,10
1/11/2019	8:00	1,0	36,00	0,27	0,09
	9:30	1,6	107,00	1,30	0,24
	11:00	1,4	158,00	1,12	0,37
	12:30	1,4	166,00	1,30	0,57
	14:00	1,4	208,00	1,53	0,61
	15:30	1,4	216,00	1,77	0,70
5/11/2019	8:00	1,2	220,00	1,17	0,82
	9:30	1,2	610,00	1,78	0,92
	11:00	1,2	204,00	1,36	1,07
	12:30	1,2	156,00	1,24	1,16
	14:00	1,0	156,00	0,89	1,12
	15:30	1,2	540,00	1,38	1,17
6/11/2019	9:30	0,8	8,00	0,04	0,66
	11:00	1,4	71,00	0,45	0,64
	12:30	1,0	150,00	0,94	0,72
	14:00	1,0	33,00	0,16	0,63
	15:30	1,2	169,00	1,45	0,72

Continuación del Cuadro A.6.2

Fecha	Hora	Caudal de cloración (L/min)	Cloro libre en A (mg/L)	Cloro libre en B (mg/L)	Cloro libre en C (mg/L)
	9:30	1,2	212,00	1,37	1,25
	11:00	1,2	169,00	1,11	1,28
7/11/2019	12:30	1,2	173,00	1,05	1,25
	14:00	1,1	196,00	1,18	1,27
	15:30	1,1	141,00	0,93	1,23

**APÉNDICE 7: DATOS DEL CLORADOR ARTESANAL DE CÁMARA SECA
MODIFICADO, CON CAUDAL MENOR A 1,0 L/MIN**

Cuadro A.7.1 Funcionamiento del artesanal de cámara seca modificado a caudales inferiores a 1,0 L/min

Caudal (L/min)	Cloro libre Punto A (mg/L)	Cloro libre Punto B (mg/L)
2,00	22,00	0,32
0,75	91,00	0,41
0,75	43,00	0,21
0,75	71,00	0,40
0,75	32,00	0,20
0,75	32,00	0,17
2,00	43,00	0,50

**APÉNDICE 8: DATOS RECABADOS PARA EL CLORADOR ARTESANAL
DE CÁMARA SECA MODIFICADO**

Cuadro A.8.1 Datos para el clorador artesanal de cámara seca modificado con el flujómetro de 0,5 a 4,0 L/min

Fecha	Hora	Caudal de cloración (L/min)	Cloro libre Punto A (mg/L)	Cloro libre Punto B (mg/L)	Cloro libre Punto C (mg/L)
26/11/2019	11:00	1,00	11,00	0,08	0,07
	12:00	1,00	35,00	0,26	0,10
	13:00	1,50	29,00	0,34	0,09
	14:00	1,50	27,00	0,35	0,12
	15:00	1,50	31,00	0,39	0,13
27/11/2019	9:00	1,50	14,00	0,19	0,28
	10:00	1,50	27,00	0,28	0,28
	11:00	1,50	26,00	0,27	0,28
	12:00	1,50	28,00	0,38	0,28
	13:00	1,50	27,00	0,33	0,28
	14:00	1,50	27,00	0,36	0,29
	15:00	1,50	36,00	0,35	0,28
28/11/2019	9:00	3,00	27,00	0,67	0,14
	10:00	3,00	33,00	0,50	0,15
	11:00	2,50	37,00	0,42	0,19
	12:00	3,00	21,00	0,03	0,13
02/12/2019	10:00	3,00	42,00	0,87	0,23
	11:00	2,00	39,00	0,81	0,29
	12:00	1,50	45,00	0,71	0,32
	13:00	1,50	13,00	0,19	0,36
	14:00	2,50	41,00	0,58	0,37
	15:00	2,50	33,00	0,41	0,35
03/12/2019	9:00	1,50	95,00	0,86	0,46
	10:00	2,00	48,00	0,73	0,47
	11:00	2,00	53,00	0,72	0,50
	12:00	2,00	44,00	0,62	0,50
	13:00	2,25	47,00	0,69	0,57
	14:00	2,00	49,00	0,76	0,58
	15:00	2,25	53,00	0,81	0,62
04/12/2019	9:00	2,00	39,00	0,60	0,61
	10:00	2,00	46,00	0,75	0,61
	11:00	2,00	50,00	0,71	0,63
	12:00	2,00	45,00	0,58	0,64
	13:00	2,00	39,00	0,66	0,64
	14:00	2,00	47,00	0,69	0,65
	15:00	2,00	35,00	0,62	0,65

Continuación del Cuadro A.8.1

Fecha	Hora	Caudal de cloración (L/min)	Cloro libre Punto A (mg/L)	Cloro libre Punto B (mg/L)	Cloro libre Punto C (mg/L)
05/12/2019	9:00	2,00	22,00	0,32	0,40
	10:00	0,75	91,00	0,41	0,42
	11:00	0,75	43,00	0,21	0,38
	12:00	0,75	71,00	0,40	0,39
	13:00	0,75	32,00	0,20	0,39
	14:00	0,75	32,00	0,17	0,36
	15:00	2,00	43,00	0,50	0,36
17/12/2019	9:30	2,00	47,00	1,19	0,43
	10:00	2,00	64,00	1,17	0,37
	11:00	2,00	55,00	0,85	0,42
	12:00	2,00	50,00	0,92	0,47
	13:00	2,00	40,00	0,74	0,52
	14:00	2,00	32,00	0,51	0,57
	15:00	2,00	44,00	0,93	0,64
18/12/2019	9:00	1,50	32,00	0,68	0,73
	10:00	2,00	26,00	0,45	0,74
	11:00	2,50	30,00	0,51	0,72
	12:00	1,50	35,00	0,47	0,70
	13:00	1,75	31,00	0,50	0,69
	14:00	1,75	32,00	0,77	0,66
	15:00	2,00	35,00	0,61	0,68
19/12/2019	10:00	2,00	51,00	1,07	0,49
	11:00	2,00	42,00	0,71	0,50
	12:00	2,00	41,00	0,68	0,54
	13:00	2,00	33,00	0,62	0,55
	14:00	2,00	37,00	0,63	0,63
	15:00	2,00	33,00	0,57	0,63
20/12/2019	9:00	2,00	74,00	0,98	0,55
	10:00	1,75	53,00	0,87	0,55
	11:00	1,50	48,00	0,86	0,62
	12:00	1,75	56,00	0,74	0,57
	13:00	1,75	51,00	0,68	0,61
	14:00	1,75	48,00	0,74	0,60

APÉNDICE 9: DATOS RECABADOS PARA EL CLORADOR ARTESANAL DE CÁMARA HÚMEDA DESARROLLADO

Cuadro A.9.1 Datos para el clorador artesanal de cámara húmeda con el flujómetro de 0,5 a 4,0 L/min

Fecha	Hora	Caudal (L/min)	Cloro libre Punto A (mg/L)	Cloro libre Punto B (mg/L)	Cloro libre Punto C (mg/L)
22/01/2020	10:00	2,25	10,00	0,30	0,16
	11:20	2,50	1,00	0,18	
	14:00	3,25	16,00	0,54	
	15:00	4,00	12,00	0,37	
	15:30	2,00	18,00	0,50	
23/01/2020	10:20	2,00	34,00	0,43	0,35
	11:40	4,00	51,00	1,21	0,48
	13:00	4,00	43,00	1,18	0,68
	14:20	3,00	47,00	0,85	0,64
	15:00	3,50	45,00	5,50	0,74
24/01/2020	10:00	3,00	35,00	0,78	0,81
	11:00	3,00	40,00	0,81	0,85
	12:00	2,50	40,00	1,80	0,86
	13:00	4,00	30,00	1,26	0,90
	14:00	4,00	30,00	0,95	0,98
	15:00	4,00	33,00	1,32	0,96

**APÉNDICE 10: DATOS DE CLORO LIBRE MEDIDOS EN LA CASA N° 115,
ASADA DE COOPEROSALES – CLORADOR ARTESANAL CÁMARA HÚMEDA**

Cuadro A.10.1 Resultados del monitoreo del cloro libre en casa N° 115, ASADA Cooperosales

Fecha	Cloro libre (mg/L)
1/7/2020	0,29
2/7/2020	0,37
3/7/2020	0,37
4/7/2020	0,39
5/7/2020	0,38
6/7/2020	0,28
7/7/2020	0,31
8/7/2020	0,33
9/7/2020	0,47
10/7/2020	0,40
11/7/2020	0,37
12/7/2020	0,29
13/7/2020	0,34
14/7/2020	0,30
15/7/2020	0,35
16/7/2020	0,35
17/7/2020	0,33
18/7/2020	0,46
19/7/2020	0,39
20/7/2020	0,51
21/7/2020	0,46
22/7/2020	0,40
23/7/2020	0,35
24/7/2020	0,39
25/7/2020	0,35
26/7/2020	0,37
27/7/2020	0,39
28/7/2020	0,32
29/7/2020	0,29
30/7/2020	0,41
31/7/2020	0,33
1/8/2020	0,37
2/8/2020	0,41
3/8/2020	0,33
4/8/2020	0,37
5/8/2020	0,37

Continuación del Cuadro A.10.1

Fecha	Cloro libre (mg/L)
6/8/2020	0,39
7/8/2020	0,41
8/8/2020	0,39
9/8/2020	0,33
10/8/2020	0,37
12/8/2020	0,38
13/8/2020	0,31
14/8/2020	0,37
15/8/2020	0,35
16/8/2020	0,39
17/8/2020	0,40
18/8/2020	0,34
19/8/2020	0,37
20/8/2020	0,39
21/8/2020	0,32
22/8/2020	0,37
23/8/2020	0,41
24/8/2020	0,39
25/8/2020	0,37
26/8/2020	0,29
27/8/2020	0,31
28/8/2020	0,35
29/8/2020	0,35
30/8/2020	0,30
31/8/2020	0,56
1/9/2020	0,50
2/9/2020	0,47
3/9/2020	0,36
4/9/2020	0,40
5/9/2020	0,44
6/9/2020	0,39
7/9/2020	0,40
8/9/2020	0,32
9/9/2020	0,33
10/9/2020	0,29
11/9/2020	0,39
12/9/2020	0,40
13/9/2020	0,37
14/9/2020	0,30
15/9/2020	0,39

Continuación del Cuadro A.10.1

Fecha	Cloro libre (mg/L)
16/9/2020	0,39
17/9/2020	0,41
18/9/2020	0,43
19/9/2020	0,37
20/9/2020	0,34
21/9/2020	0,30
22/9/2020	0,46
23/9/2020	0,41
28/9/2020	0,29
29/9/2020	0,37
30/9/2020	0,40
1/10/2020	0,46
2/10/2020	0,39
3/10/2020	0,33
4/10/2020	0,37
5/10/2020	0,41
6/10/2020	0,39
7/10/2020	0,36
10/10/2020	0,40
11/10/2020	0,44
12/10/2020	0,44
13/10/2020	0,39
14/10/2020	0,36
15/10/2020	0,36
16/10/2020	0,33
17/10/2020	0,40
18/10/2020	0,43
19/10/2020	0,47
20/10/2020	0,41
21/10/2020	0,39
22/10/2020	0,40
26/10/2020	0,39
27/10/2020	0,32
28/10/2020	0,34
29/10/2020	0,36
30/10/2020	0,39
31/10/2020	0,39
1/11/2020	0,33
2/11/2020	0,39
3/11/2020	0,47
4/11/2020	0,49

Continuación del Cuadro A.10.1

Fecha	Cloro libre (mg/L)
5/11/2020	0,50
6/11/2020	0,46
6/11/2020	0,46
7/11/2020	0,40
8/11/2020	0,42
9/11/2020	0,35
10/11/2020	0,34
11/11/2020	0,34
12/11/2020	0,38
13/11/2020	0,32
14/11/2020	0,30
15/11/2020	0,37
16/11/2020	0,34
17/11/2020	0,47
18/11/2020	0,40
19/11/2020	0,34
20/11/2020	0,30
21/11/2020	0,37
22/11/2020	0,35
23/11/2020	0,51
24/11/2020	0,41
28/11/2020	0,31
29/11/2020	0,37
30/11/2020	0,30
1/12/2020	0,37
2/12/2020	0,37
3/12/2020	0,37
4/12/2020	0,40
5/12/2020	0,35
6/12/2020	0,35
7/12/2020	0,29
8/12/2020	0,38
9/12/2020	0,38
10/12/2020	0,41
11/12/2020	0,39
12/12/2020	0,41
13/12/2020	0,37
14/12/2020	0,33
15/12/2020	0,39
16/12/2020	0,40
17/12/2020	0,41

Continuación del Cuadro A.10.1

Fecha	Cloro libre (mg/L)
19/12/2020	0,35
26/12/2020	0,43
27/12/2020	0,38
28/12/2020	0,41
29/12/2020	0,48
30/12/2020	0,51

APÉNDICE 11: DATOS ORP MEDIDOS EN EL CENTRO COMERCIAL

Cuadro A.11.1 Resultados del monitoreo del cloro libre y medición del potencial de oxidación-reducción (ORP) en noviembre 2020

Fecha	Set point (mV)	ORP (mV)	Cloro libre (ppm)
3/11/2020	670	799	1,08
4/11/2020	670	799	0,97
5/11/2020	670	799	1,30
6/11/2020	670	799	1,19
7/11/2020	670	784	0,97
8/11/2020	670	777	0,87
9/11/2020	670	769	0,81
16/11/2020	670	784	0,54
17/11/2020	670	792	0,54
18/11/2020	670	784	0,65
19/11/2020	670	777	0,54
20/11/2020	670	762	0,54
21/11/2020	670	769	0,43
22/11/2020	670	762	0,43
23/11/2020	670	749	0,38
24/11/2020	670	732	0,38
25/11/2020	700	732	0,32
27/11/2020	700	719	0,43
28/11/2020	720	739	0,60
29/11/2020	720	724	0,60
30/11/2020	720	732	1,03

Cuadro A.11.2 Resultados del monitoreo del cloro libre y medición del potencial de oxidación-reducción (ORP) en enero 2021

Fecha	Set point (mV)	ORP (mV)	Cloro libre (ppm)
1/1/2021	650	675	0,97
2/1/2021	650	703	0,50
3/1/2021	650	688	1,00
7/1/2021	650	692	0,92
9/1/2021	650	650	0,70
14/1/2021	-	626	0,65
15/1/2021	700	731	0,60
16/1/2021	640	641	0,60
17/1/2021	640	609	0,49
18/1/2021	640	616	0,43
22/1/2021	640	728	0,60
24/1/2021	640	696	0,49
25/1/2021	640	595	0,54
27/1/2021	640	676	0,54
29/1/2021	640	600	0,30
30/1/2021	640	719	0,50

APÉNDICE 12: CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO LIBRE EN EL TANQUE DE MEZCLA

Ante la necesidad de conocer el caudal de cloración adecuado, que permita cumplir con la norma nacional, se consultaron las fichas técnicas de los equipos Accu-Tab, donde se encontró un gráfico dosificación de cloro libre vs. caudal de cloración (Anexo 1, Figura A.1). Tomando algunos valores de la figura, se pudo construir el Cuadro A.12.1.

Cuadro A.12.1 Dosificación de cloro libre para el clorador Accu-Tab modelo 3012

Flujo (G/min)	Dosificación (Lb/hr)
0	0
0,8118	0,02448
1,2403	0,03654
2	0,059

Los valores del Cuadro A.12.1 se convirtieron para manejarlos con las mismas unidades que se han manejado en este trabajo.

Cuadro A.12.2 Dosificación de cloro libre para el clorador Accu-Tab modelo 3012

Flujo (L/min)	Dosificación (mg/min)
0,0	0,0
3,1	187,7
4,7	280,1
7,6	452,3

Con los datos del Cuadro A.12.2, se creó la Figura A.12.1, además de una ecuación lineal, que permitió calcular la dosificación de cloro en términos del caudal de cloración.

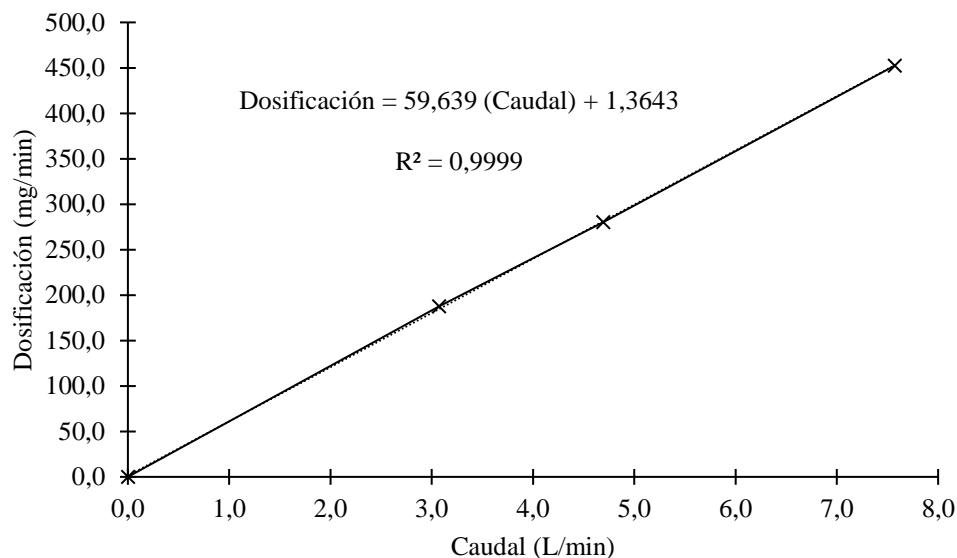


Figura A.12.1 Dosificación de cloro libre en términos del caudal

Partiendo del caudal promedio de 150 L/min de agua cruda que ingresan al tanque de mezcla (Barret, 2019) y una la demanda de cloro de 0,65 mg/L, en el Punto B se requeriría una concentración de cloro de 1,25 mg/L, para que al pasado el tiempo de contacto en los tanques de almacenamiento, se pueda tener una concentración de cloro libre entre los 0,30 y 0,60 mg/L de cloro libre. Al despejar el caudal de cloración de la ecuación de la Figura A.12.1, se obtiene la Ecuación 11.

$$\text{Caudal} = \frac{(\text{Dosificación}) - 1,3643}{59,639} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

Dosificación corresponde al producto de los valores de caudal promedio y la dosis requerida en el Punto A

De la Ecuación 11, se obtiene que para dosificar 1,25 mg/L de cloro en el Punto A, se necesita un caudal de cloración de 3,12 L/min. Realizando un balance de masas, se obtiene la Ecuación 12.

$$Q_1 C_1 = Q_2 C_2 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

Q_1 es el caudal de cloración

C_1 es la concentración de cloro en el Punto A

Q_2 es el caudal de agua cruda que ingresa al sistema

C_2 es la concentración de cloro libre en el Punto B

Despejando la Ecuación 12, se encontró que en el Punto A debe hallarse una concentración 60,0 mg/L de cloro para cumplir con todo lo anterior.

ANEXOS

ANEXO 1: GRÁFICO DE DOSIFICACIÓN PARA EL CLORADOR ACCU-TAB 3012

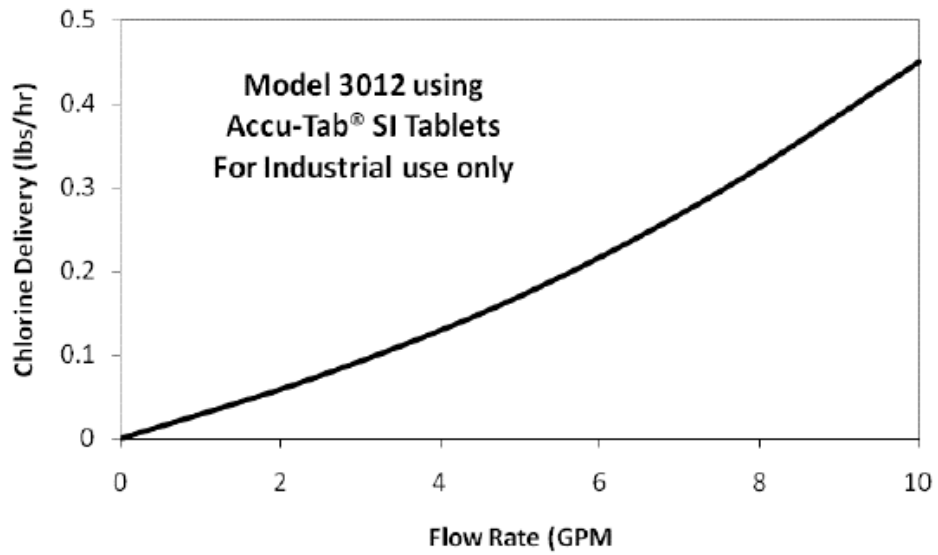


Figura A.1 Dosificación de cloro libre para el clorador Accu-Tab modelo 3012 (PurAqua Products, 2009)