

Evaluación de eficiencia de remoción de coliformes fecales con compuestos de cloro en aguas residuales tratadas

Evaluation of the removal efficiency of fecal coliforms with chlorine compounds in treated wastewater

Elsy Zamora Urcina¹ , Zenón Much Santos¹

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: elsyzam2@gmail.com

Recibido: 10/04/2024

Revisión: 09/10/2024

Aceptado: 28/10/2024

Resumen

Se investigó la eficiencia de remoción de coliformes fecales al desinfectar aguas residuales tratadas con hipoclorito de calcio granulado [$\text{Ca}(\text{ClO})_2$] e hipoclorito de sodio (NaClO). El objetivo fue comparar e identificar el compuesto de cloro más eficiente al menor costo. Se tomaron siete muestras de agua en diferentes días y fuentes, determinando los coliformes fecales iniciales. Luego, cada muestra se dividió para desinfectar con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ e NaClO a dosis de 10, 15 y 20 mg/L. Se utilizó un periodo de contacto de 30 minutos y se añadió tiosulfato de sodio para inhibir la acción del cloro. Se realizó el análisis de coliformes fecales por el método de tubos de fermentación por diluciones múltiples. Los resultados muestran que estadísticamente no hay diferencia significativa entre las eficiencias obtenidas para los tratamientos aplicados. Esto sugiere que ambos compuestos, $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ e NaClO , son opciones viables para desinfectar aguas residuales, con eficiencias de remoción superiores al 99% para todos los tratamientos. Sin embargo, se concluyó que para desinfectar caudales de hasta 5 L/s, el tratamiento más eficiente y económico es el $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ con dosis de 10 mg/L. Dicho tratamiento cumple en un 95% el parámetro de coliformes fecales según el acuerdo gubernativo 236-2006 y tiene un costo de Q.0.84/m³ tratado. El NaClO requiere una dosis de 15 mg/L para alcanzar el mismo porcentaje de cumplimiento y el costo es de Q.1.00/m³.

Palabras claves: Agua residual tratada, desinfección, cloración, hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio.

Abstract

The removal efficiency of fecal coliforms was investigated when disinfecting wastewater treated with granulated calcium hypochlorite [$\text{Ca}(\text{ClO})_2$] and sodium hypochlorite (NaClO). The objective was to compare and identify the most efficient chlorine compound. Seven water samples were taken on different days and sources, determining the initial fecal coliforms. Then, each sample was divided to disinfect with $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ and NaClO at doses of 10, 15 and 20 mg/L. A contact time of 30 minutes was used, and sodium thiosulfate was added to inhibit the action of chlorine. Fecal coliform analysis was performed by the Multiple-Tube Fermentation Technique. The results show that there is no statistically significant difference between the efficiencies obtained for the applied treatments. This suggests that both $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ and NaClO are viable options for disinfecting wastewater, with removal efficiencies greater than 99% for all treatments. However, it was concluded that to disinfect flow of up to 5 L/s, the most efficient and economical treatment is $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ with a dose of 10 mg/L. This treatment meets 95% of the fecal coliform parameter according to government agreement 236-2006 and has a cost of Q.0.84/m³ treated. NaClO requires a dose of 15 mg/L to achieve the same percentage of compliance, and the cost is Q.1.00/m³.

Key words: Treated wastewater, disinfection, chlorination, calcium hypochlorite, sodium hypochlorite.



Introducción

El crecimiento de la población mundial ha implicado un aumento en la generación de aguas residuales de origen doméstico, industrial, agrícola, entre otros. Muchas veces, esas aguas, son dispuestas en el ambiente sin el tratamiento adecuado. Esto ha ocasionado afectación en los ecosistemas, así como la salud de las personas por la ingesta o uso de agua contaminada por agentes microbiológicos (Pelczar, Reid, & Chan, 1982).

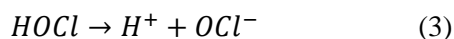
La desinfección es una etapa fundamental en el tratamiento de las aguas residuales para la remoción de agentes microbiológicos. Habiendo tantas alternativas de desinfección, es necesario seleccionar la más adecuada según la calidad del agua a tratar y la disponibilidad de recursos económicos.

Almazán y Medrano (2015) expresan que el cloro es el desinfectante más utilizado a nivel mundial tanto en los sistemas de agua potable como residuales. Por ello, el objetivo de esta investigación fue identificar el compuesto de cloro más eficiente para la remoción de coliformes fecales en aguas residuales tratadas.

El hipoclorito de calcio y el hipoclorito de sodio, al entrar en contacto con agua, reaccionan como se muestra en la ecuación 1 y 2 respectivamente.

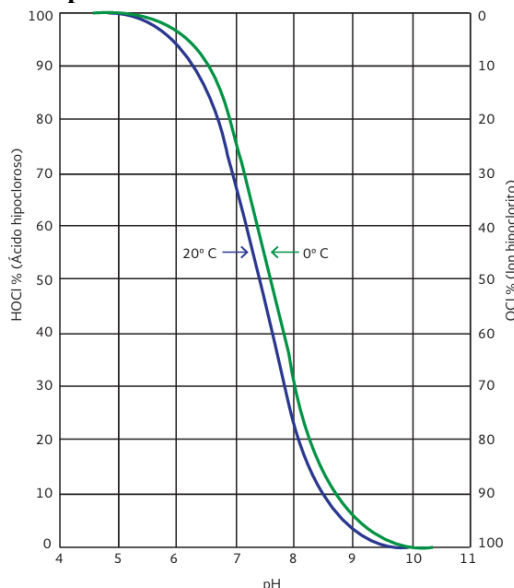


Ambos compuestos producen ácido hipocloroso (HOCL), el cual, se disocia para producir ion hidronio (H^+) e ion hipoclorito (OCl^-) (ver ecuación 3).



A pH entre 6.5 y 8.5, el HOCl no se disocia completamente y coexiste con el OCl^- (ver figura 1). Ambas fracciones son desinfectantes pero el HOCl tiene mayor eficiencia de desinfección que el OCl^- , por esta razón, se prefiere la cloración a pH's ácidos.

Figura 1. Distribución del HOCl y del OCl a diferentes valores de pH.



Fuente: Tomado de “Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento”, Almazán y Medrano, 2015.

Antecedentes

Sigüí (2022) concluye que, la cloración es una excelente alternativa para efluentes bien nitrificados y periodos largos de tiempo de contacto. También indica que es importante demostrar en qué casos la cloración es efectiva y económicamente viable (inversión en infraestructura, operación y mantenimiento). Así, la alternativa de desinfección seleccionada será la más idónea en cada proyecto a ejecutar.

Pilco (2023) determinó las mejores dosis de $Ca(ClO)_2$ para disminuir la contaminación del efluente de la PTAR “El Artezón” del Cantón Pillaro en Ecuador. La PTAR donde se realizó el estudio se compone de un reactor anaerobio de flujo ascendente seguido de un filtro anaerobio de flujo ascendente. Los resultados fueron de 10.59 mg/L y 15 mg/L, las cuales presentaron eficiencias de remoción de coliformes fecales de 91.19% y 92.15%.

Ávila y Fajardo (2020) compararon $Ca(ClO)_2$ al 73% con $NaClO$ al 10% como desinfectantes del efluente de un sistema lagunar de tratamiento de aguas residuales. Los resultados mostraron que ambos tratamientos fueron óptimos en la remoción de coliformes fecales. Sin embargo, el $Ca(ClO)_2$ esterilizó 0.2 NMP/100 mL más que el $NaClO$.

Pérez (2017) realizó la comparación económica de la utilización de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$, NaClO y Cloro Gaseoso como desinfectantes en agua potable. Encontró que para mantener una concentración de 1 mg/L de cloro en caudales menores a 7.89 L/s el compuesto más económico es el NaClO . Para caudales mayores, el cloro gaseoso es la opción más económica.

Reyes (2016) evaluó la eficiencia de remoción de coliformes fecales con cloro gas en los efluentes de dos PTAR de Durango, México. La eficiencia de remoción de coliformes fecales se determinó llevando a cabo un balance general a la entrada y salida. Los resultados fueron de 99.9999% en las dos plantas, excepto en otoño (99.9905%) y en invierno (99.9974%) en la planta oriente. Esto debido a una mala dosificación y a problemas de operación en la planta.

Reyes (2010) investigó el efecto de concentraciones de 8, 20 y 30 mg/L de NaClO sobre bacterias aisladas provenientes de agua tratada. Utilizó tiempos de contacto de 20 y 30 minutos. Los valores medios de porcentajes de remoción de *E. coli* para las tres concentraciones a 20 minutos son las siguientes respectivamente: 54.82%, 55.76% y 75.08%. Los resultados para 30 minutos como tiempo de contacto fueron: 75.56%, 77.51% y 87.40%.

Otros autores han realizado comparaciones de otros métodos de desinfección en aguas residuales tratadas. Solano (2015) comparó NaClO con Yodo. Gordillo (2013) evaluó dióxido de cloro estabilizado con Ozono y UV/Peróxido. Arana y Mancero (2022) analizaron pastillas de cloro y ácido peracético.

Materiales y método

En la presente investigación se adoptó el enfoque cuantitativo con un diseño del tipo experimental, por la manipulación deliberada de variables. Dichas variables son: tipo de desinfectante, dosis de cloro y tiempo de contacto. Se observó su efecto en la remoción de coliformes fecales en aguas residuales, recolectada de diferentes efluentes de plantas de tratamiento en ciudad de Guatemala.

Sitios de muestreo.

Se eligieron plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico de dos residenciales de la ciudad de Guatemala. Residencial Aurora II de zona 13 y Residencial Hacienda Real de zona 16. La PTAR de Aurora II es una planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), que cuenta con diferentes sistemas de tratamiento. Los que se consideraron fueron la laguna facultativa primaria a escala piloto y el sistema de 3 filtros percoladores en serie, seguido de un sedimentador secundario. Las dos PTAR de la residencial Hacienda Real están compuestas por un reactor anaerobio de flujo ascendente, un filtro percolador y un clarificador final. Estas últimas son operadas por EMPAGUA.

Muestra.

Para calcular la muestra, se siguió el proceso del diseño experimental por bloques con dos factores; del cual resultaron 6 combinaciones de tratamientos para cada bloque:

- Factor 1: Tipo de Desinfectante (2 niveles):
 - Hipoclorito de calcio $\text{Ca}(\text{ClO})_2$
 - Hipoclorito de sodio NaClO
- Factor 2: Concentración del Desinfectante (3 niveles): 10, 15 y 20 mg/L.

Un bloque es una muestra de agua residual, a la cual se le midió inicialmente la cantidad de coliformes fecales presentes. Luego se sometió a cada uno de los tratamientos con un tiempo de contacto de 30 minutos. Posteriormente se obtuvo una lectura inicial y final de coliformes fecales y se evaluó el porcentaje de remoción de este parámetro.

Cada bloque representa una muestra de días distintos y de diferentes fuentes, con la finalidad de evaluar los desinfectantes bajo condiciones diferentes de contaminación.

Para calcular el número de réplicas (bloques) se empleó el análisis de varianza para medias utilizando la calculadora de tamaño muestral GRANMO (2024), con los siguientes datos:

- Nivel de significancia (α) = 0.05
- Tipo de contraste = “unilateral”
- Control del error tipo II, aceptar H_0 falso (β) = 0.20
- Poder de la prueba (P) = $1 - \beta = 0.80$
- Número de tratamientos (K) = 6
- Límite de error (e) = Se asumió un error máximo correspondiente a dos veces la desviación estándar de la respuesta (relación $S/e = 0.5$)

El resultado de esta prueba es que se precisan 7 réplicas (bloques) en cada tratamiento para detectar una diferencia mínima de 2 desviaciones estándar entre 6 tratamientos.

La Tabla 1 describe los bloques y los tratamientos a los que fue sometido cada uno de los bloques, teniendo en consideración que:

- B= Bloque
- MST= Muestra sin tratamiento
- T= Tipo de Desinfectante
- D= Dosis

Tabla 1. Descripción de tratamientos por cada réplica (Bloque)

Bloque	Muestra	Tratamientos					
		1	2	3	4	5	6
B-1	MST ₁	T ₁ D ₁	T ₁ D ₂	T ₁ D ₃	T ₂ D ₁	T ₂ D ₂	T ₂ D ₃
B-2	MST ₂	T ₁ D ₁	T ₁ D ₂	T ₁ D ₃	T ₂ D ₁	T ₂ D ₂	T ₂ D ₃
B-3	MST ₃	T ₁ D ₁	T ₁ D ₂	T ₁ D ₃	T ₂ D ₁	T ₂ D ₂	T ₂ D ₃
B-4	MST ₄	T ₁ D ₁	T ₁ D ₂	T ₁ D ₃	T ₂ D ₁	T ₂ D ₂	T ₂ D ₃
B-5	MST ₅	T ₁ D ₁	T ₁ D ₂	T ₁ D ₃	T ₂ D ₁	T ₂ D ₂	T ₂ D ₃
B-6	MST ₆	T ₁ D ₁	T ₁ D ₂	T ₁ D ₃	T ₂ D ₁	T ₂ D ₂	T ₂ D ₃
B-7	MST ₇	T ₁ D ₁	T ₁ D ₂	T ₁ D ₃	T ₂ D ₁	T ₂ D ₂	T ₂ D ₃

Cada tratamiento se realizó por triplicado, por lo cual constan de un total de 21 análisis de coliformes fecales. Para el $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ y NaClO , ambos con dosis de 10 mg/L, se realizó un muestreo adicional (muestra triplicada). Por ello, estos dos tratamientos tienen un total de 24 análisis de coliformes fecales.

Muestreo.

Los bloques (muestras de agua residual) se recolectaron como se indican en la Tabla 2:

Tabla 2. Sitios de recolección de muestra por cada bloque

Bloque	Fecha	Sitio de recolección
B-1	06/02/2024	Efluente laguna facultativa PTAR Aurora II
B-P*	13/02/2024	Efluente laguna facultativa PTAR Aurora II
B-2	19/02/2024	Efluente laguna facultativa PTAR Aurora II
B-3	04/03/2024	Efluente laguna facultativa PTAR Aurora II
B-4	11/03/2024	Efluente laguna facultativa PTAR Aurora II
B-5	09/04/2024	Efluente sedimentador secundario PTAR Aurora II
B-6	16/04/2024	Efluente clarificador PTAR Hacienda Real I
B-7	07/05/2024	Efluente filtro percolador PTAR Hacienda Real III

* En este muestreo, no se realizaron los análisis para todos los tratamientos, por problemas técnicos. Debido a esto, únicamente se realizaron 7 análisis de coliformes fecales, los cuales correspondieron a la muestra de agua sin tratamiento y a dos tratamientos, $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ con dosis de 10 mg/L y NaClO también con dosis de 10 mg/L ambos por triplicado.

En cada muestreo se recolectó 2.5 galones de agua residual de los efluentes indicados en la tabla anterior.

Inmediatamente después de recolectadas las muestras, se trasladaron al Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina” de EMPAGUA-ERIS. Este se ubica en el edificio T-5 de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

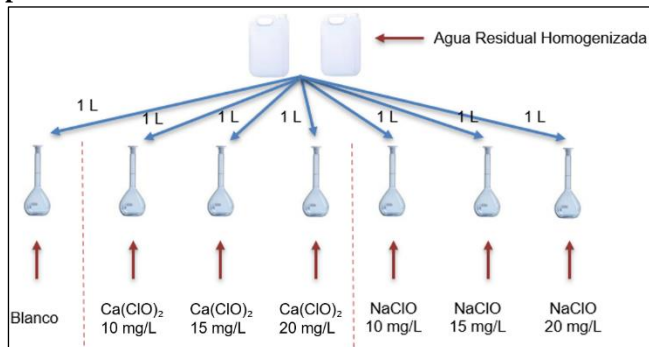
Preparación de tratamientos de desinfección.

Se homogenizó la muestra de agua recolectada para asegurar que los tratamientos fueran aplicados a una calidad de agua uniforme. Se le midió pH, Temperatura y Turbiedad.

Para dividir la muestra homogenizada, se vertió 1 litro de muestra a un total de 7 balones aforados con tapón de 2 litros cada uno (ver figura 2).

Cada balón aforado representa un tratamiento de cloración. Adicionalmente, hay 1 balón con agua sin ningún tratamiento. Con base al tratamiento correspondiente, se le agregó el volumen de hipoclorito de sodio o de calcio necesario en cada caso (ver figura 2).

Figura 2. Diagrama de incorporación de desinfectantes por tratamiento



Después de añadir el desinfectante se agitó vigorosamente el balón aforado tapado durante 1 minuto y luego se dejó reposar cada balón durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo, se aplicó a cada balón una gota de tiosulfato de sodio al 10% por cada 100 mL de agua residual desinfectada.

Ya que se debían analizar tres muestras por cada tratamiento, dos de estas muestras se procesaron en laboratorios privados. La tercera se analizó por la investigadora en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina” de EMPAGUA-ERIS.

Determinación de Coliformes Fecales

La detección de coliformes fecales se realizó por el método de tubos de fermentación por diluciones múltiples. Este método cuenta con una etapa presuntiva y una confirmativa.

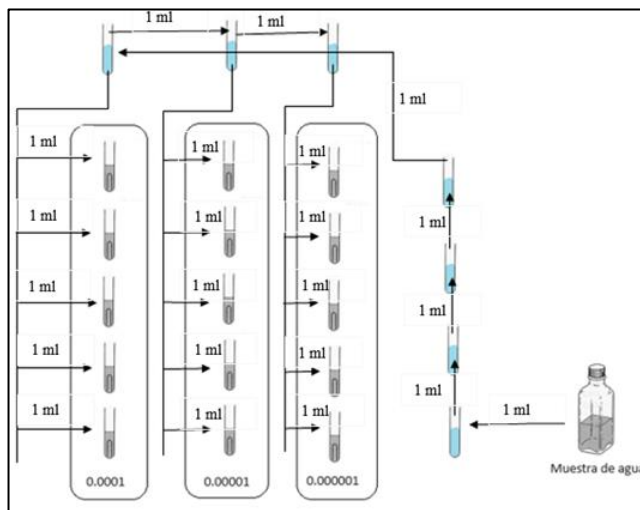
En la etapa presuntiva, se utilizó el producto “Difco Lactose Broth” y en la etapa confirmativa “Difco EC Medium” como medios de cultivo. Se dispuso 9 mL del medio en tubos de ensayo con un tubo durham invertido en su interior. Luego se llevaron al autoclave a 121°C durante 15 minutos para esterilizarlos.

Para la etapa presuntiva, se utilizó 3 series de 5 tubos. En cada serie, se sembró un determinado volumen de muestra de agua (mediante diluciones) según el valor esperado de coliformes fecales (considerando las características del agua).

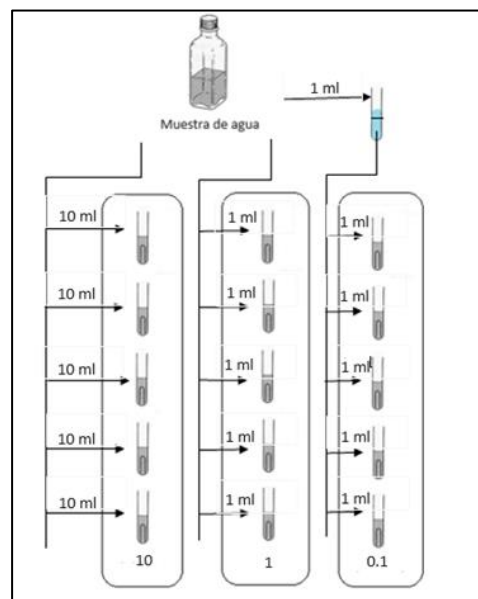
En la mayoría de los análisis realizados, se utilizaron las diluciones de la siguiente manera: Para la muestra sin tratamiento 0.00001-0.000001-0.0000001 mL (ver figura 3a). Para las muestras de agua con los diferentes tratamientos de desinfección 10-1-0.1 mL (ver figura 3b). En algunos análisis se decidió realizar una o dos diluciones adicionales, esperando la presencia de mayor NMP de Coliformes Fecales.

Figura 3. Esquema de diluciones y siembra de bacterias en tubos de fermentación (etapa presuntiva).

a. Muestra de agua sin tratamiento



b. Muestra de agua con tratamiento

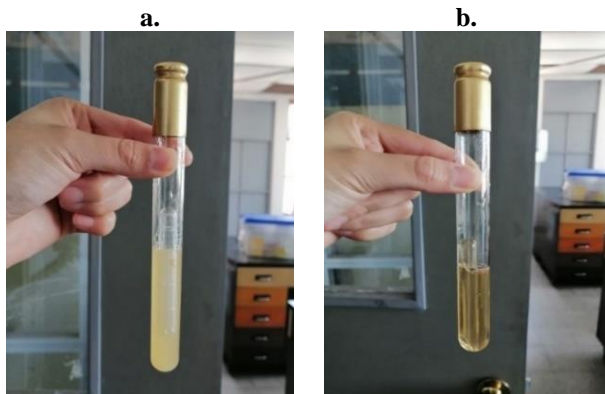


Los tubos sembrados se dejaron en una incubadora a 35° C por 48 horas. Posteriormente, se realizó la lectura de los tubos positivos.

Para la etapa confirmativa, se extrajo muestra de agua del tubo positivo en la etapa presuntiva y se sembró en el medio de cultivo de la etapa confirmativa. Estos se dejaron en una incubadora a 45°C por 24 horas. Transcurrido este tiempo, se procedió a la interpretación.

Se consideran resultados positivos los que presentan formación de gas en su interior (ver figura 4a). Los resultados negativos no presentan formación de gas (ver figura 4b).

Figura 4. Tubo positivo y negativo resultante de prueba confirmativa.



Instrumentos y técnicas de obtención de información.

El equipo de laboratorio utilizado fue el siguiente; a) Gradillas metálicas para tubos de ensayo. b) Tubos de cultivo o de ensayo de 22 mm x 175 mm (para la fase presuntiva). c) Tubos de cultivo o de ensayo de 18 mm x 150 mm (para la fase confirmativa). d) Tubos Durham. e) Pipetas de 10 mL y de 1 mL estériles. f) Mechero. g) Asa de inoculación. h) Autoclave. i) Incubadora de 35 °C. j) Incubadora de baño maría a 44 °C. También se utilizaron los siguientes instrumentos: k) Medidor portátil de temperatura y pH/EC/TDS marca HANNA HI 9813-6. l) Turbidímetro de lámpara de tungsteno TL2300, EPA, 0-4000 NTU marca HACH.

El análisis de coliformes fecales se realizó conforme a lo establecido en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24 edición,

apartado 9221 B. Técnica estándar de fermentación de coliformes totales, C. Estimación de densidad de bacterias, y E. Procedimiento de Coliforme Termotolerante (Fecal).

Procesamiento de Datos y Análisis Estadístico

Previo al análisis estadístico definitivo, se realizó un análisis exploratorio de los datos. Este reveló la existencia de dos datos fuera de rango (“outliers”) para el tratamiento de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ a 15 mg/L. Se realizó la prueba de Grubbs y los dos valores (86.6666666666667) estuvieron significativamente fuera de rango ($p < 0.05$).

Estos dos datos se excluyeron del análisis definitivo. Para mantener el diseño balanceado se realizó un procedimiento de imputación simple, sustituyéndolos por el promedio de los datos del tratamiento de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ a 15 mg/L.

Para todas las combinaciones de tratamientos (compuesto y dosis), se estimaron los estadísticos descriptivos de “media” y “desviación estándar” con el programa Minitab.

Se hizo una prueba de normalidad de la totalidad de los datos por medio del test de Kolmogorov-Smirnov. Este indicó que se alejan significativamente de la distribución normal ($p < 0.01$).

De igual forma, se hizo la prueba para cada tratamiento individualmente, por medio del test de Ryan-Joiner (equivalente al de Shapiro-Wilks). Este indicó que todos se alejan significativamente de la distribución normal ($p < 0.01$).

Se realizó la prueba de Levene, la cual dio como resultado que las varianzas de los tratamientos no presentan diferencia significativa ($p = 0.098$).

Las hipótesis planteadas para correr el método fueron:

Hipótesis Nula (H_0)= Todas las varianzas son iguales.
Hipótesis Alternativa (H_a)= Por lo menos una varianza es diferente.

Nivel de significancia (α)= 0.05

Se determinaron los intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar.

Para verificar si el remanente de coliformes fecales en el agua residual desinfectada cumplen con el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006; se realizó una prueba de hipótesis binomial.

Parámetro de calidad: que el cumplimiento al Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, sea mayor al 85%. Los resultados cumplen con el Acuerdo cuando el remanente de bacterias después de la desinfección es menor que 10,000 NMP/100 mL.

Hipótesis a probar:

Ho: $p = 0.85$

Ha: $p > 0.85$

Principio de la prueba: Se determinó la cantidad de muestras que cumplen y las que no cumplen con el reglamento. Por medio de la distribución binomial, se calculó la probabilidad de que el evento no fuera aleatorio en función de la proporción de cumplimiento esperado (valor p). Si el valor p asociado al número de muestras que cumplen es ≤ 0.05 , entonces la Ho se rechaza y se concluye que sí se cumple significativamente la norma en un 85%.

Análisis Económico

Como complemento al análisis técnico de los tratamientos propuestos como desinfectantes, se realizó el análisis económico de los mismos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Vida útil del sistema de desinfección = 7 años
- Caudales a tratar = 1 L/s, 5 L/s, 20 L/s
- Concentración $(\text{CaClO})_2 = 65\%$
- Concentración NaClO = 10%
- Dosis de desinfectante = 10 mg/L y 15 mg/L
- Volumen del tanque clorador para la estación de $\text{Ca}(\text{ClO})_2 = 750 \text{ L}$
- Volumen caneca de NaClO = 208 L
- Valor de rescate = Q. 0.00
- Tasa de interés = 10%
- Costo de caneca de 45 kg de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ al 65% = Q. 1,600.00*
- Costo de tonel de 208 L de NaClO al 10% = Q. 1,350.00*
- Costo de preparación de solución clorada cuando se disuelve menos de 10 kg de $\text{Ca}(\text{ClO})_2 = \text{Q.}100.00^{**}$

- Costo de preparación de solución clorada cuando se disuelve entre 10kg y 20 kg de $\text{Ca}(\text{ClO})_2 = \text{Q.}160.00^{**}$
- Costo de cambio de tonel de NaClO de 208 Litros = Q. 50.00**

* Costos obtenidos de promedio de cotizaciones realizadas a diferentes tiendas en Ciudad de Guatemala.

**Precios promedios a partir de consultas realizadas a personas que operan este tipo de sistemas, asumiendo que cuentan con todo el equipo de protección e insumos necesarios para realizar la actividad. Precio incluye la calibración del dosificador.

Como primer paso, se calculó el costo mensual de los dos compuestos de cloro para diferentes caudales (1 L/s, 5 L/s y 20 L/s) y aplicando dosis de 10 y 15 mg/L. Para continuar con el análisis, se consideraron únicamente las opciones que no resultaban peligrosas o no recomendables por no ser prácticas en su operación.

Con la información anterior, se calculó los costos anuales para ambos compuestos a dosis de 10 y 15 mg/L en cuanto a:

- Costo de instalación
- Costo anual de cloro
- Costo anual operador

Si P es el precio de instalación en el presente y A es la anualidad, entonces:

$$A = P (A/P, \text{Interés}, \text{Periodos}) \quad (4) \text{ Tarquin y Blank (2012)}$$

$$A = P(A/P, 10\%, 7 \text{ años})$$

Utilizando las tablas de factores de interés compuesto de Tarquin y Blank (2012), se determinó la anualidad del precio de instalación.

Se calculó la anualidad total mediante una suma simple y se dividió entre los metros cúbicos tratados en el año.

La alternativa que más conviene es la que trata el metro cúbico al menor precio (la opción que presenta mayor eficiencia al menor costo).

Resultados

En la tabla 3 se muestran los resultados de los parámetros de control (pH, Temperatura y Turbiedad) para las muestras de agua.

Tabla 3. Resultados parámetros de control

Bloque	pH	Temp. (°C)	Turb. (NTU)
B-1	7.8	19.5	
B-P	8.0	22.2	92.4
B-2	7.6	21.4	151
B-3	7.74	23.0	78.2
B-4	6.9	22.1	133.0
B-5	8.2	25.0	5.44
B-6	7.2	25.3	47.6
B-7	7.4	26.9	33.5
Medias	7.62	23.14	77.31

De la tabla 4 a la 11 se muestran los resultados de Número más probable (NMP) y eficiencias obtenidas en cada una de las repeticiones (bloques) con las combinaciones de compuesto de cloro y dosis utilizadas en la presente investigación:

Tabla 4. Resultados promedios obtenidos en la 1era repetición del experimento (B-1)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	140,000,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	1.33	99.99999905
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	1.33	99.99999905
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	2.07	99.99999852
NaClO 10 mg/L	1266.67	99.99909524
NaClO 15 mg/L	907.33	99.99935190
NaClO 20 mg/L	223.33	99.99984048

Tabla 5. Resultados promedios obtenidos en la 2da repetición del experimento (B-2)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	39,000,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	534.07	99.99863060
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	1.33	99.99999658
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	1.33	99.99999658
NaClO 10 mg/L	9,337.00	99.97605897
NaClO 15 mg/L	5,453.70	99.98601615
NaClO 20 mg/L	151.33	99.99961197

Tabla 6. Resultados promedios obtenidos en la 3era repetición del experimento (B-3)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	240,000,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	138.00	99.99994250
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	8.70	99.99999638
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	1.33	99.99999944
NaClO 10 mg/L	61.57	99.99997435
NaClO 15 mg/L	60.73	99.99997469
NaClO 20 mg/L	19.40	99.99999192

Tabla 7. Resultados promedios obtenidos en la 4ta repetición del experimento (B-4)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	7,800,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	39.70	99.99949103
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	1.33	99.99998291
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	1.33	99.99998291
NaClO 10 mg/L	6.73	99.99991368
NaClO 15 mg/L	6.73	99.99991368
NaClO 20 mg/L	1.33	99.99998291

Tabla 8. Resultados promedios obtenidos en la 5ta repetición del experimento (B-5)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	160,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	263.20	99.83550000
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	1.80	99.99887500
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	8.87	99.99445833
NaClO 10 mg/L	683.93	99.57254167
NaClO 15 mg/L	151.27	99.90545833
NaClO 20 mg/L	100.60	99.93712500

Tabla 9. Resultados promedios obtenidos en la 6ta repetición del experimento (B-6)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	16,000,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	5,826.43	99.96358479
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	3,380.60	99.97887125
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	160.37	99.99899771
NaClO 10 mg/L	41,866.67	99.73833330
NaClO 15 mg/L	33.33	99.99979167
NaClO 20 mg/L	2,105.27	99.98684208

Tabla 10. Resultados promedios obtenidos en la repetición parcial del experimento (B-P)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	33,000,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	23.33	99.99992929
NaClO 10 mg/L	33.27	99.99989919

Tabla 11. Resultados promedios obtenidos en la 7ma repetición del experimento (B-7)

Tratamiento aplicado	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Eficiencia de remoción (%)
Muestra sin tratamiento	120,000,000.00	n/a
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	646.67	99.99946111
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	515.80	99.99957017
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	766.67	99.99936111
NaClO 10 mg/L	6,400.00	99.99466667
NaClO 15 mg/L	1,262.33	99.99894806
NaClO 20 mg/L	98.60	99.99991783

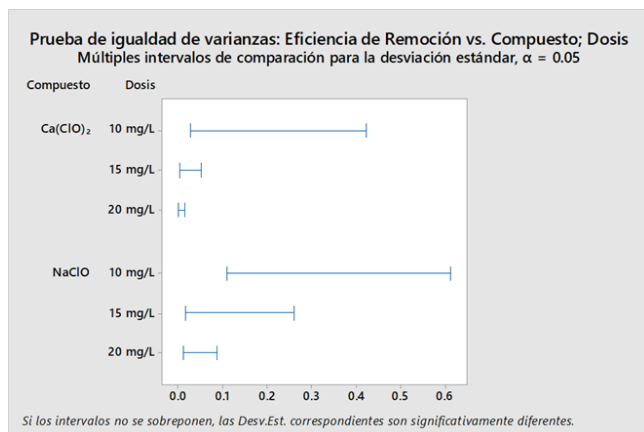
En la Tabla 12, se presentan los estadísticos descriptivos para la eficiencia de remoción de cada tratamiento aplicado:

Tabla 12. Estadísticos descriptivos para la eficiencia de remoción de coliformes fecales obtenido con cada tratamiento

Tratamiento aplicado	N	Media	Desviación Estándar
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	24	99.975	0.101
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	21	99.996	0.012
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	21	100.00	0.003
NaClO 10 mg/L	24	99.910	0.244
NaClO 15 mg/L	21	99.984	0.062
NaClO 20 mg/L	21	99.989	0.029

En la figura 5 se muestran los intervalos de Bonferroni para las desviaciones estándar de cada tratamiento.

Figura 5. Intervalos de confianza de Bonferroni para cada tratamiento



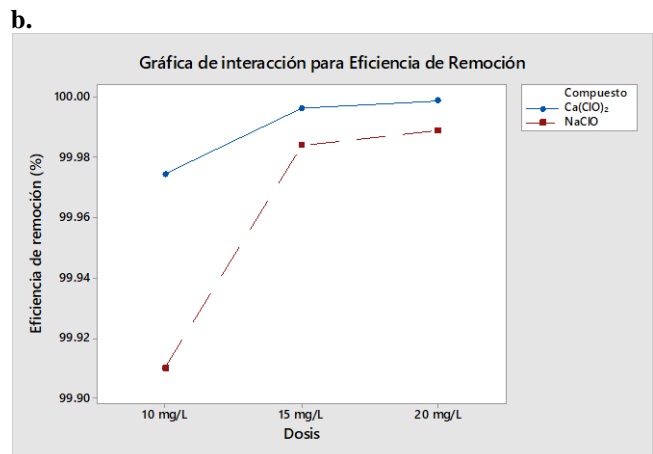
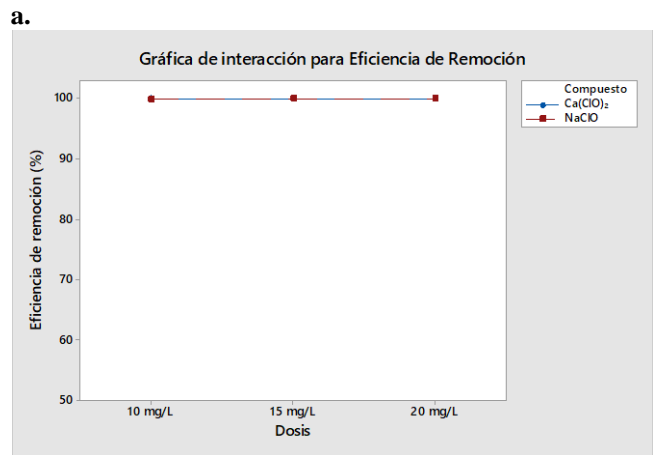
En la tabla 13 se muestra el resultado de la prueba de homogeneidad de varianza (Levene).

Tabla 13. Resultado de prueba de Levene.

Estadística de prueba	Valor p
1.91	0.098

En la figura 6a se muestra la gráfica de interacción de las eficiencias de remoción de los tratamientos utilizados. En la figura 6b se muestra la misma gráfica, pero con el eje de las “y” magnificado.

Figura 6. Gráfica de interacción para eficiencias de remoción.



En la tabla 14, se muestra los resultados de cumplimiento del parámetro coliformes fecales de todos los tratamientos aplicados en base al Acuerdo Gubernativo 236-2006. En la figura 7 y 8 se muestran gráficamente los resultados de cumplimiento al mismo acuerdo que tuvo cada tratamiento con su respectiva réplica.

Tabla 14. Cumplimiento de coliformes fecales al Acuerdo Gubernativo 236-2006

Tratamiento	Cumple	No Cumple	% Cum.	P
Ca(ClO) ₂ 10 mg/L	20	1	95	0.155
Ca(ClO) ₂ 15 mg/L	21	0	100	0.033
Ca(ClO) ₂ 20 mg/L	21	0	100	0.033
NaClO 10 mg/L	16	5	76	0.917
NaClO 15 mg/L	20	1	95	0.155
NaClO 20 mg/L	21	0	100	0.033

Figura 7. Cumplimiento de tratamientos con Ca(ClO)₂ al Acuerdo Gubernativo 236-2006

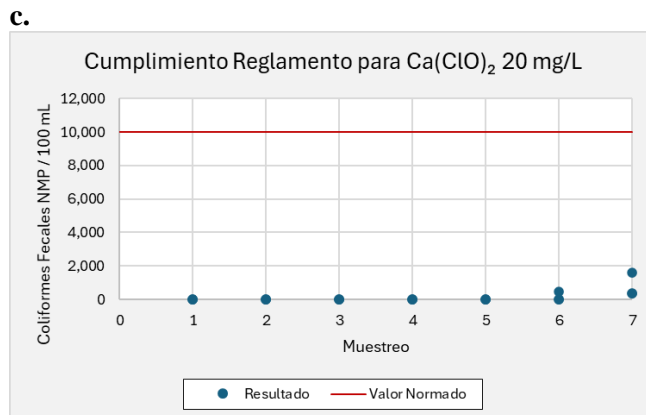
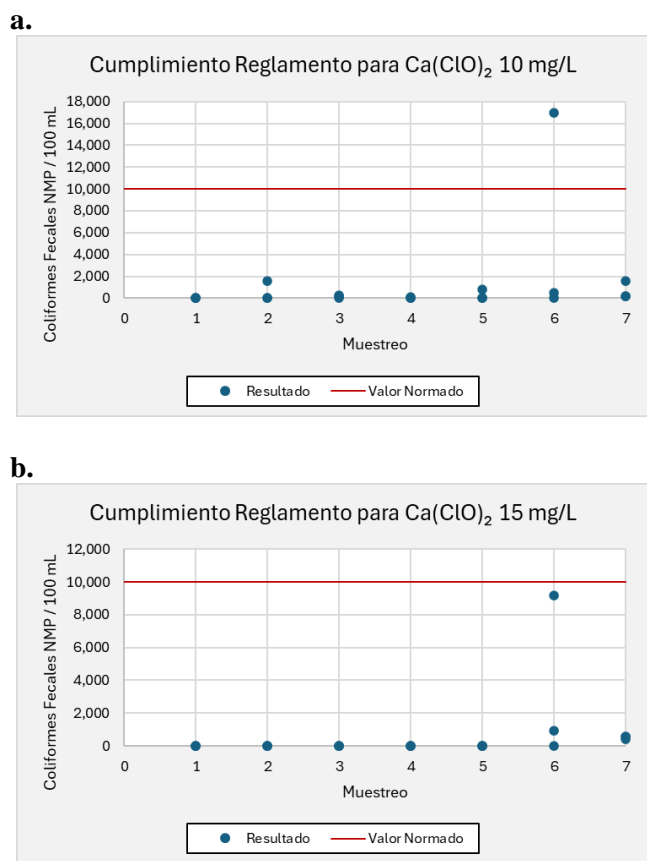
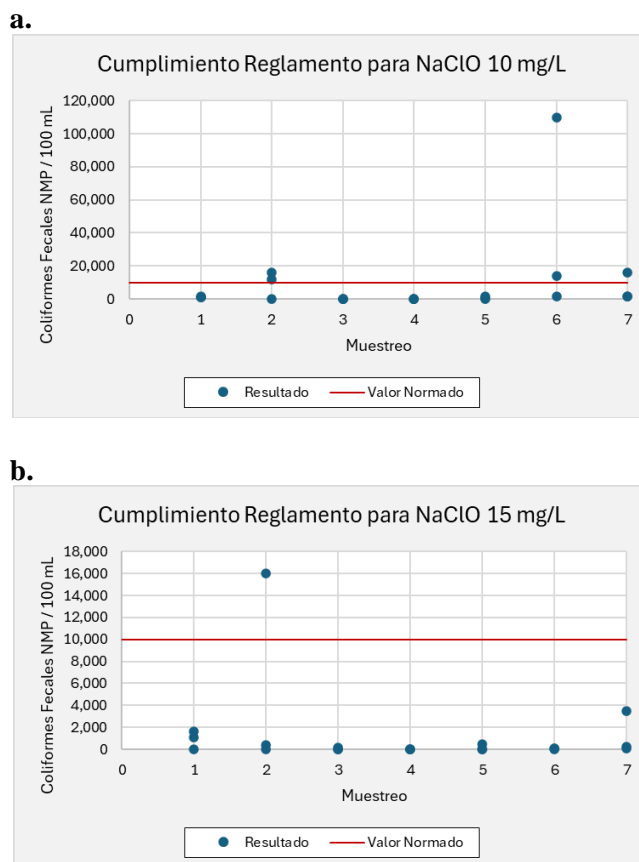
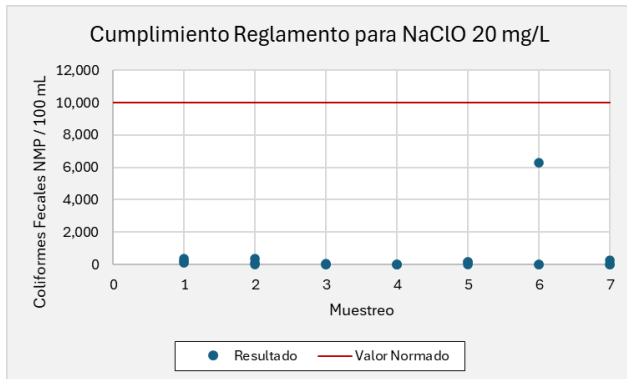


Figura 8. Cumplimiento de tratamientos con NaClO al Acuerdo Gubernativo 236-2006



c.



En las tablas 15 y 16, se muestran los requerimientos de hipoclorito de calcio para ser dosificado a 10 mg/L y a 15 mg/L respectivamente y para tratar caudales de 1, 5 y 20 L/s de agua residual.

En las tablas 17 y 18 se muestran los requerimientos de NaClO para ser dosificado a 10 mg/L y a 15 mg/L respectivamente y para tratar caudales de 1, 5 y 20 L/s de agua residual.

Tabla 15. Requerimientos de dosificación de Ca(ClO)₂ para dosis de 10 mg/L

Descripción	Unidad	Caudal Q. (L/s)		
		1	5	20
Caudal de solución clorada a aplicar (q)	L/H	8	15	18
Peso de Ca(ClO) ₂ a disolver	Kg	5.19	13.85	46.15
Tiempo de recarga tanque clorador	Días	3.91	2.08	1.74
Concentración de solución clorada	%	0.45	1.20	4.00
N de canecas de 45 kg de Ca(ClO) ₂ por mes	Canecas/mes	0.89	4.43	17.72

Tabla 16. Requerimientos de dosificación de Ca(ClO)₂ para dosis de 15 mg/L

Descripción	Unidad	Caudal Q. (L/s)		
		1	5	20
Caudal de solución clorada a aplicar (q)	L/H	8	15	18
Peso de Ca(ClO) ₂ a disolver	Kg	7.79	20.77	69.23
Tiempo de recarga tanque clorador	Días	3.91	2.08	1.74
Concentración de solución clorada	%	0.68	1.80	6.00
N de canecas de 45 kg de Ca(ClO) ₂ por mes	Canecas/mes	1.33	6.65	26.58

Tabla 17. Requerimientos de dosificación de NaClO para dosis de 10 mg/L

Descripción	Unidad	Caudal Q. (L/s)		
		1	5	20
Caudal de solución clorada a aplicar (q)	L/H	0.36	1.80	7.20
Volumen de NaClO utilizado en 1 día	L/día	8.64	43.20	172.80
Tiempo de recarga tanque clorador	Días	24.07	4.81	1.20
N. de toneles de NaClO al 10% al mes	Toneles/mes	1.25	6.23	24.92

Tabla 18. Requerimientos de dosificación de NaClO para dosis de 15 mg/L

Descripción	Unidad	Caudal Q. (L/s)		
		1	5	20
Caudal de solución clorada a aplicar (q)	L/H	0.54	2.70	10.80
Volumen de NaClO utilizado en 1 día	L/día	12.96	64.80	259.20
Tiempo de recarga tanque clorador	Días	16.05	3.21	0.80
N. de toneles de NaClO al 10% al mes	Toneles/mes	1.87	9.35	37.98

En la tabla 19 se muestran los costos de instalación y costos anuales que implican cada una de las alternativas de tratamiento propuesta para tratar caudales de 1 y 5 L/s con dosis de 10 mg/L de cada compuesto.

Tabla 19. Costos anuales y de instalación para dosificar 10 mg/L de compuesto de cloro.

Compuesto Caudal (L/s)	Ca(ClO) ₂		NaClO	
	1	5	1	5
Costo de instalación (Q.)	2,000.00	2,000.00	700.00	700.00
Costo anual de cloro (Q.)	17,014.15	85,070.77	20,187.69	100,938.46
Costo Operador (Q.)	9,216.00	27,648.00	747.69	3,738.46

En la tabla 20, se muestran los costos de instalación y costos anuales que implican cada una de las alternativas de tratamiento propuesta para caudales de 1 y 5 L/s con dosis de 15 mg/L de cada compuesto.

Tabla 20. Costos anuales y de instalación para dosificar 15 mg/L de compuesto de cloro.

Compuesto Caudal (L/s)	Ca(ClO) ₂		NaClO	
	1	5	1	5
Costo de instalación (Q.)	2,000.00	2,000.00	700.00	700.00
Costo anual de cloro (Q.)	25,521.23	127,606.15	30,281.54	151,407.69
Costo Operador (Q.)	9,216.00	27,648.00	1,121.54	5,607.69

Finalmente, en la tabla 21., se muestra el costo del metro cúbico de agua desinfectada para los tratamientos propuestos.

Tabla 21. Costos del metro cúbico de agua desinfectado

Dosis Caudal (L/s)	10 mg/L		15 mg/L	
	1	5	1	5
Ca(ClO) ₂	Q. 0.84	Q. 0.72	Q. 1.11	Q. 0.99
NaClO	Q. 0.67	Q. 0.66	Q. 1.00	Q. 1.00

Hallazgos

Los resultados de las eficiencias de remoción de coliformes fecales se presentan para valores promedio de pH de 7.62, Temperatura de 23.14 °C y turbidez de 77.31 UNT.

Debido al valor de pH (promedio de 7.62), aproximadamente el 50% de la concentración de cloro presente fue de ácido hipocloroso no disociado y el otro 50% fue ión hipoclorito (ver figura 1).

Las medias de las eficiencias de remoción de coliformes fecales son muy similares para todos los tratamientos aplicados. Las desviaciones estándar que no superan ni siquiera 0.3 unidades, respaldan esta observación.

Como puede observarse en la gráfica de intervalos de confianza de Bonferroni (figura 5), algunos intervalos no se sobrepone con otros en diferentes niveles. Pero los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas (Levene) indican que las varianzas de los tratamientos no presentan diferencia significativa (Valor p= 0.098). Por lo tanto, las desviaciones estándar tampoco presentan diferencia significativa.

De lo anterior, de lo que se visualiza en la tabla 13 (valores p> 0.05) y de lo que se observa en la gráfica de interacción (figura 6a); se ratifica que los tratamientos no presentan diferencia significativa entre los promedios de los dos factores individuales, ni en la combinación de estos (Compuesto y dosis).

Sin embargo, se puede notar (en forma descriptiva) que el hipoclorito de calcio presenta ligeramente mejores resultados que el hipoclorito de sodio. En ambos casos, a mayor dosis aplicada, mejor eficiencia de remoción de coliformes fecales. Esto se observa mejor en la Figura 6b.

Los tratamientos que muestran un 100% de cumplimiento al Acuerdo Gubernativo 236-2006 son: Ca(ClO)₂ con dosis de 15 y 20 mg/L y el NaClO con dosis de 20 mg/L. No obstante, los otros tratamientos también muestran excelentes porcentajes de cumplimiento: El Ca(ClO)₂ con dosis de 10 mg/L y el NaClO con dosis de 15 mg/L presentan ambos un 95% de cumplimiento. El NaClO con dosis de 10 mg/L presenta un 76% de cumplimiento.

De los requerimientos de dosificación para los tratamientos con Ca(ClO)₂ granulado (ver tabla 15 y 16) se puede observar que para desinfectar caudales mayores a 5 L/s, los pesos de Ca(ClO)₂ para preparar las soluciones cloradas, son bastante elevados. Esto implica la preparación de la solución por tandas o bloques, volviendo menos práctico el uso de este derivado del cloro. También requiere mayor exposición del operador a un compuesto tóxico y potencialmente peligroso en periodos muy consecutivos. Por lo tanto,

no es recomendable utilizar esta presentación de cloro para dichos caudales.

En las tablas 19 y 20 se puede observar que los costos anuales de hipoclorito de calcio son menores a los costos anuales de hipoclorito de sodio. Sin embargo, resulta más costoso el costo del operador del sistema que utiliza hipoclorito de calcio, que el costo del operador del sistema de hipoclorito de sodio. Esto se debe a la diferencia significativa de manipulación entre un sistema y otro. El primero debe preparar la solución clorada, el segundo únicamente debe colocar el nuevo recipiente y ponerlo en marcha.

En relación con los costos por metro cúbico desinfectado (tabla 21), se evidencia que el hipoclorito de sodio tiene un costo inferior al hipoclorito de calcio cuando se utiliza la misma dosis.

Relacionando los porcentajes de cumplimiento al Acuerdo Gubernativo 236-2006 con los costos de metro cúbico desinfectado, nos damos cuenta de que, para alcanzar un porcentaje de cumplimiento del 95%, se necesitaría utilizar hipoclorito de calcio con dosis de 10 mg/L ó hipoclorito de sodio con dosis de 15 mg/L. Los costos de metro cúbico de agua desinfectada para estos dos tratamientos son Q. 0.84 y Q. 1.00 respectivamente. Esto nos indica que el compuesto de cloro que tiene mayor eficiencia al menor costo es el Hipoclorito de calcio con dosis de 10 mg/L

Discusión de resultados

Los resultados muestran eficiencias de remoción de coliformes fecales superiores a 99% para todos los tratamientos aplicados. Dichos resultados son similares a los obtenidos por Reyes (2016), donde se utilizó cloro g y se obtuvieron eficiencias de 99.9999%.

Pilco (2023) encontró que las mejores dosis de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ con tiempo de reacción de 30 minutos fueron 10.59 mg/L y 15 mg/L. Con ellas obtuvo eficiencias de remoción de coliformes fecales de 91.19% y 92.15% respectivamente. Estos resultados fueron más bajos que las eficiencias obtenidas en el presente trabajo, ya que, para dosis de 10 y 15 mg/L se obtuvieron 99.975% y 99.996%. Esto puede deberse a las condiciones de mezcla, ya que este trabajo se realizó en un ambiente controlado (en laboratorio).

Ávila y Fajardo (2020) compararon el $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ al 73% con el NaClO al 10% a dosis de 0.1, 0.3, 0.5 y 1 mg/L como desinfectantes de aguas residuales. Ellos encontraron que ambos tratamientos fueron óptimos para la disminución de la coliformes fecales pero que el $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ esterilizó 0.2 NMP/100 mL más que el NaClO . Lo antes expuesto coincide con el presente trabajo, donde se encontró que el $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ proporcionó mejores eficiencias que el NaClO .

Las eficiencias no fueron significativas en términos de porcentaje, pero si se logra ver una diferencia en el NMP/100 mL. En promedio, el $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ removió 2,446.79 NMP/100 mL de coliformes fecales más que el NaClO .

Lo anterior se explica con las fórmulas de reacción química de los compuestos de cloro con el agua (ecuación 1 y 2). Por cada molécula de hipoclorito de calcio se forman dos moléculas de ácido hipocloroso (HOCl). Mientras que el hipoclorito de sodio solo forma una molécula de ácido hipocloroso. Es importante destacar que el ácido hipocloroso es la especie con mayor poder bactericida.

Reyes (2010) encontró que el número de UFC/100 μL disminuye al incrementar la concentración de NaClO y el tiempo de contacto. Para dosis de 8, 20 y 30 mg/L y tiempo de contacto de 30 minutos, obtuvo eficiencias de remoción de E. Coli de 75.56%, 77.51% y 87.40% respectivamente. Si bien las eficiencias son mucho menores a las obtenidas en el presente estudio (diferente tipo de indicador y de metodología empleada), la premisa se cumplió de la misma manera. A mayor dosis, mejor eficiencia de remoción.

Pérez (2017), que encontró que para desinfectar caudales (de agua potable) menores a 7.89 L/s, el compuesto más económico de usar es el NaClO . En la presente investigación también se concluye que para caudales menores a 5 L/s, el compuesto más económico de usar es el NaClO . Esto siempre y cuando la comparación se haga para las mismas dosis sin considerar la eficiencia.

Conclusiones

En términos descriptivos, se concluye que el hipoclorito de calcio presenta en promedio una mejor eficiencia de remoción de coliformes fecales que el hipoclorito de sodio como desinfectante para aguas residuales tratadas.

En términos estadísticos, no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos aplicados para la eficiencia de desinfección. Esto sugiere que tanto el hipoclorito de calcio como el hipoclorito de sodio pueden ser opciones viables para la desinfección de aguas residuales y la elección de la mejor opción podría basarse en otros factores como el cumplimiento a la legislación, el costo, la disponibilidad y el contexto de cada sistema de tratamiento.

El tratamiento que presenta mayor eficiencia al menor costo para tratar caudales de hasta 5 L/s es el hipoclorito de calcio con dosis de 10 mg/L.

Los potenciales usuarios de esta información deben elegir el desinfectante en base a sus propias necesidades. Deben considerar los requerimientos de tratamiento, el presupuesto disponible, las condiciones de seguridad del personal, entre otros aspectos.

Debido a las limitaciones en el presupuesto no fue posible evaluar la presencia de compuestos reductores (materia orgánica, manganeso, hierro, nitritos y amoníaco) en las aguas residuales antes y después de aplicar el desinfectante. El estudio de la demanda de cloro y su relación con la turbiedad no fue considerado en la presente investigación. Incorporar este tema habría extendido significativamente el alcance del presente estudio. Tampoco se pudo evaluar los desinfectantes a tiempos de contacto menores a 30 minutos, lo cual hubiera sido muy interesante.

Para futuros estudios relacionados con la desinfección de aguas residuales, se sugiere enfocarse en la utilización de tabletas de cloro debido a que presentan mayor facilidad en la dosificación, en el almacenamiento y manipulación segura frente a otros compuestos desinfectantes. También se recomienda evaluar la relación de la demanda de cloro con la formación de organoclorados cuando se realiza la desinfección con cloro.

Agradecimientos

La autora desea patentizar su agradecimiento al MSc. Ing. Zenón Much y Moisés Adolfo Dubón Gálvez del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina” de EMPAGUA-ERIS por el tiempo dedicado y la colaboración brindada para realizar esta investigación. A Lic. Oscar Federico Nave del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas (USAC) por su apoyo con el análisis estadístico. A mi compañero de maestría Ing. Engel Cáceres por toda la colaboración brindada. A Tereso Pérez de la PTAR Aurora II y a EMPAGUA por la disponibilidad y el apoyo brindado en los muestreos y al MSc. Ing. Norman Siguí (ERIS) por el apoyo brindado en la concepción de la idea de investigación.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios de la autora y fondos proporcionados por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD).

Conflicto de interés

La autora declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Zamora Urcina, E., & Much Santos, Z. (2024). Evaluación de eficiencia de remoción de coliformes fecales con compuestos de cloro en aguas residuales tratadas. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 19(1), 1-11. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v19i1.1696>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Diseño, trabajo de campo y laboratorio, recolección de datos, análisis de datos, elaboración del documento: E. Z.U.

Diseño y supervisión de investigación y revisión del manuscrito: Z.M.S.

Referencias

- Almazán García, F. y Medrano Baca, M. (2015). Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. Tlalpan, Mexico: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. In: Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th ed. Washington DC: APHA Press; 2023.
- Arana Contreras, S. M., & Mancero Escobar, S. B. (2022). Evaluación de la remoción de coliformes fecales aplicando pastillas de cloro y ácido peracético en una planta de tratamiento de aguas residuales en el Cantón Daule, La Aurora. Tesis de grado, ULVR, Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción Carrera de Ingeniería Civil, Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/4871>
- Ávila Sánchez, É. N., & Fajardo Vélez, J. D. (2022). Optimización del método de desinfección químico para la disminución de coliformes fecales y SARS-Cov-2 en el sistema lagunar de tratamiento de aguas residuales del cantón general Villamil Playas. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/60227>
- Datarus. (2024). Granmo: Calculadora en línea. Recuperado de <https://www.datarus.eu/aplicaciones/granmo/>
- Gordillo de Coss, G. E. (2013). Investigación técnica y económica sobre desinfección de aguas residuales por sistemas de oxidación. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM), Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente [hasta 2014], Madrid. doi: <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.14415>
- Pelczar, M. J., Reid, R. D., & Chan, E. S. (1982). Microbiología del agua de uso doméstico y de las aguas negras. En Microbiología (págs. 681-687). México: McGraw - Hill.
- Pérez Cano, C. E. (2017). Evaluación bacteriológica, desinfectante y económica de los sistemas hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio y cloro gaseoso para la aplicación en agua para consumo humano. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/8223>
- Pilco Quinaluiza, C. J. (febrero de 2023). Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24368>
- Reyes Gómez, L. M. (2010). Efecto de distintas concentraciones de hipoclorito de sodio sobre bacterias aisladas de agua tratada. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Reyes López, M. G. (2016). Uso del cloro en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas: desinfección y formación de subproductos. [Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/23350/1/Tesis%20Gpe%20Reyes%20.pdf>
- Sigú Gil, N. L. (2022). Aspectos a considerar en la cloración de aguas residuales. Agua, Saneamiento & Ambiente, 17(2). doi: <https://doi.org/10.36829/08ASA.v17i2.1492>
- Sigú Gil, N. L. (2022). Aspectos a considerar en la cloración de aguas residuales. Agua, Saneamiento & Ambiente, 17(2). doi: <https://doi.org/10.36829/08ASA.v17i2.1492>
- Solano García, Á. J. (2015). Comparación de dos métodos de desinfección de aguas residuales, provenientes del sector porcicultor. Universidad ECCI. Obtenido de <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/1932/Informe%20de%20pasantía.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tarquín, A. y Blank, L. (2012). Ingeniería Económica. Álvaro Obregón, Mexico: Mc Graw-Hill Interamericana Editores