



Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Comportamiento cinético del cloro libre y optimización de la dosificación de cloro en el sistema de agua potable de Tutupali Chico

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Ambiental

Autores:

Evelin Andrea Aguilar Chuya
Joseph Ricardo Chuñir Chillogallo

Director:

Fausto Fernando García Ávila
ORCID:  0000-0002-9274-9769

Cuenca, Ecuador
2024-09-11

Resumen

Este estudio abordó el comportamiento del cloro residual en una red de distribución de agua potable. El cloro es el desinfectante más utilizado globalmente, ya que su residual libre asegura la desinfección continua del agua en la red. En áreas rurales, la deficiencia en el tratamiento del agua cruda y su desinfección requiere conocer la cinética del cloro para optimizar la desinfección y cumplir con la normativa nacional sobre la concentración de cloro residual. Los objetivos incluyeron determinar el orden de reacción y las constantes cinéticas del cloro: constante de reacción con el agua (k_b) y con la pared de la tubería (k_w). Se buscó mejorar la dosificación en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) obteniendo la dosis óptima de hipoclorito de calcio según las características del agua filtrada. En 15 puntos de muestreo estratégicos, se midió la concentración de cloro residual en verano (agosto, septiembre, octubre) e invierno (febrero, marzo, abril). Usando el método integral, se determinó el orden de reacción, y mediante ajuste exponencial, las constantes cinéticas ($k_b=0.406 \text{ h}^{-1}$ y $k_w=0.079 \text{ h}^{-1}$). Para optimizar la dosificación de cloro, se realizó la cloración a punto de quiebre en tres ensayos, obteniéndose una dosis óptima de 2.97 mg/L con un cloro residual de 0.92 mg/L. El estudio concluyó en que las constantes cinéticas son específicas para cada red de distribución, dependiendo del agua y el entorno. Los resultados obtenidos sobre la dosis óptima concuerdan con la literatura, validando el método aplicado.

Palabras clave del autor: cloro residual, constantes cinéticas, dosis óptima, calidad del agua



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This study addressed the behavior of residual chlorine in a drinking water distribution network. Chlorine is the most widely used disinfectant globally, since its free residual ensures the continuous disinfection of water in the network. In rural areas, the deficiency in the treatment of raw water and its disinfection requires knowing the kinetics of chlorine to optimize disinfection and comply with national regulations on residual chlorine concentration. The objectives included determining the order of reaction and the kinetic constants of chlorine: constant of reaction with water (k_b) and with the pipe wall (k_w). It was sought to improve the dosage in the drinking water treatment plant (PTAP) obtaining the optimal dose of calcium hypochlorite according to the characteristics of the filtered water. At 15 strategic sampling points, the concentration of residual chlorine was measured in summer (August, September, October) and winter (February, March, April). Using the integral method, the order of reaction was determined, and by exponential adjustment, the kinetic constants ($k_b=0.406 \text{ h}^{-1}$ and $k_w=0.079 \text{ h}^{-1}$). To optimize the chlorine dosage, point-of-break chlorination was carried out in three trials, obtaining an optimal dose of 2.97 mg/L with a residual chlorine of 0.92 mg/L. The study concluded that the kinetic constants are specific to each distribution network, depending on the water and the environment. The results obtained on the optimal dose are consistent with the literature, validating the method applied.

Author keywords: residual chlorine, kinetic constants, optimal dose, water quality



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.
Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Lista de abreviaturas

AWWA: American Water Works Association

CF: Coliformes Fecales

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

CT: Coliformes Totales

EPA: Environmental Protection Agency

MON: Materia Orgánica Natural

OMS: Organización Mundial de la Salud

PTAP-TC: Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tutupali Chico

SPD: Subproductos de Desinfección

TOC: Carbono Orgánico Total

THMs: Trihalometanos

Índice de contenido

Portada.....	1
Resumen	2
Abstract	3
Lista de Abreviaturas	4
1 Capítulo I: Introducción	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Problemática	13
1.3 Justificación.....	14
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivo general	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
2 Capítulo II: Marco Teórico	16
2.1 Calidad del agua potable y características del cloro	16
2.1.1 Potabilización del agua	16
2.1.2 Sistemas de distribución de agua potable	18
2.2 Cloración del agua	19
2.2.1 Métodos de dosificación	19
2.2.2 Características del cloro y sus compuestos derivados	19
2.2.3 Reacciones del cloro con el agua.....	20
2.2.4 Subproductos de la reacción del cloro con el agua	21
2.2.5 Factores influyentes en la cloración	21
2.3 Cinética química del cloro	22
2.3.1 Orden de reacción	22
2.3.2 Clasificación del orden de reacción.....	23
2.3.2.1 Reacción de orden cero.....	23
2.3.2.2 Reacción de primer orden.....	24
2.3.2.3 Reacción de segundo orden	25
2.4 Coeficientes de reacciones que influyen en el decaimiento de cloro	26
2.4.1 Coeficiente global de decaimiento, K	26
2.4.2 Constante cinética de reacción del cloro con el agua, k_b	27
2.4.3 Constante cinética de reacción del cloro con la pared de la tubería, k_w	27

2.5	Optimización de la dosificación del hipoclorito de calcio	28
2.5.1	Demanda de cloro.....	28
2.5.2	Punto de quiebre.....	28
2.5.3	Eficiencia en la acción del cloro para destruir patógenos	29
2.6	Normativa Aplicable	30
3	Capítulo III: Metodología.....	32
3.1	Área de Estudio.	32
3.1.1	Descripción general de la zona de estudio	32
3.1.2	Descripción de la PTAP de Tutupali Chico.	33
3.2	Identificación de los puntos de muestreo dentro de la red y toma de muestras	34
3.3	Obtención del orden de reacción del cloro.	36
3.4	Determinación de las constantes cinéticas del cloro (kb, kw y K)	37
3.4.1	Determinación de la constante de reacción del cloro con el agua, kb	37
3.4.2	Determinación de la constante de interacción del cloro con la pared, kw.....	38
3.4.3	Determinación del coeficiente global de decaimiento, K.	38
3.5	Optimización del proceso de cloración a punto de quiebre	40
3.5.1	Determinación de la demanda de cloro	40
3.5.2	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos.	41
4	Capítulo IV: Resultados y Discusión.....	43
4.1	Monitoreo de Cloro Residual.	43
4.2	Determinación del orden de reacción del cloro	52
4.3	Obtención del coeficiente de reacción del cloro con el agua, kb	56
4.4	Obtención del coeficiente global de decaimiento del cloro, K.....	60
4.5	Cálculo de la constante de interacción del cloro con la pared de la tubería, kw	64
4.6	Dosificación óptima del cloro.	65
4.6.1	Determinación de la dosis óptima de cloro para la PTAP de Tutupali Chico ...	65
4.6.2	Determinación de la cantidad de Hipoclorito de Calcio	72
5	Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	74
5.1	Conclusiones	74
5.2	Recomendaciones	76

6	Referencias Bibliográficas	77
7	Anexos	84
7.1	Anexo A. Vista superior PTAP de Tutupali Chico	84
7.2	Anexo B. Registro Fotográfico de los Equipos y Reactivos.	85
7.3	Anexo C. Fichas de muestreo para levantamiento de datos.	86
7.4	Anexo D. Resultados de la relación variables - concentración de cloro residual. ...	94
7.5	Anexo E. Gráficas de Orden de Reacción.....	97
7.6	Anexo E. Curvas de decaimiento de cloro libre para la determinación de kb.	112
7.7	Anexo F. Ensayos de laboratorio para determinar la dosis óptima de cloro.	119

Índice de figuras

Figura 1. Filtro grueso de Flujo Ascendente.	17
Figura 2. Esquema de un filtro lento de arena.	17
Figura 3. Dosificador de cloro a presión.	18
Figura 4. Esquema de una red de distribución de agua potable.	19
Figura 5. Representación lineal de una reacción de orden cero.	24
Figura 6. Representación lineal de una reacción de primer orden.	25
Figura 7. Representación lineal de una reacción de segundo orden.	26
Figura 8. Representación de la curva de demanda de cloro..	29
Figura 9. Relación de la concentración de cloro en función del tiempo de contacto para eliminar agentes patógenos.	30
Figura 10. Mapa de la red de Distribución de Agua Potable de Tutupali Chico.	32
Figura 11. a) y b) Tanques de captación de las fuentes de agua superficial, c) Tanque de captación de la fuente de agua subterránea.	33
Figura 12. Diagrama del proceso de Tratamiento de Agua Cruda en la PTAP TC.	34
Figura 13. Mapa de los puntos de medición del cloro residual.	34
Figura 14. Concentraciones de cloro residual de los meses de verano.	44
Figura 15. Concentraciones de cloro residual de los meses de invierno.	45
Figura 16. Resultados de las mediciones de turbiedad en los meses de verano.	46
Figura 17. Resultados de las mediciones de turbiedad en los meses de invierno.	47
Figura 18. Resultados de las mediciones de pH en los meses de verano.	48
Figura 19. Resultados de las mediciones de pH en los meses de invierno.	48
Figura 20. Gráfico de dispersión con línea de regresión de la relación entre el cloro residual y la temperatura.	50
Figura 21. Relación entre la concentración de cloro residual y el pH.	51
Figura 22. Relación entre la turbiedad y la concentración de cloro residual.	51
Figura 23. Porcentajes promedio de los valores de R^2 del orden de reacción obtenidos en los seis meses analizados.	53
Figura 24. Variación de R^2 de la reacción de orden cero de los seis meses de monitoreo.	54
Figura 25. Variación de R^2 de la reacción de primer orden de los seis meses de monitoreo.	55

Figura 26. Variación de R^2 de la reacción de segundo orden de los seis meses de monitoreo.	55
Figura 27. Comportamiento del coeficiente kb en los meses de monitoreo.	58
Figura 28. Comportamiento del coeficiente kb en las épocas de monitoreo.	58
Figura 29. Medición del caudal utilizando el método volumétrico.	61
Figura 30. Curva de Demanda de Cloro de la PTAP TC (Ensayo 1).	67
Figura 31. Curva de Demanda de Cloro de la PTAP TC (Ensayo 2)	68
Figura 32. Curva de Demanda de Cloro de la PTAP TC (Ensayo 3).	69

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de procesos implementados comúnmente para la potabilización del agua ..	16
Tabla 2. Clasificación y descripción de los tipos de cloro	20
Tabla 3. Requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano	30
Tabla 4. Número, referencia y coordenadas del sitio de muestreo	35
Tabla 5. Descripción de los equipos de medición	36
Tabla 6. Equipos o metodologías utilizadas para la medición de parámetros	42
Tabla 7. Concentraciones de cloro residual de la red de distribución en mg/L	43
Tabla 8. Valores Promedios Mensuales de las concentraciones de cloro residual	44
Tabla 9. Coeficiente de reacción del cloro con el agua, k_b (h^{-1})	57
Tabla 10. Valores promedios mensuales correspondientes a k_b	57
Tabla 11. Resultados de TOC en los puntos extremos de la red.	60
Tabla 12. Características de la tubería	61
Tabla 13. Resultados del ensayo 1 de la obtención del caudal de salida del tanque de reserva de la PTAP	61
Tabla 14. nsayo 2 de la obtención del caudal de salida del tanque de reserva de la PTAP.	62
Tabla 15. Datos obtenidos en el ensayo 1 con respecto a las variables K	63
Tabla 16. Datos obtenidos en el ensayo 2 con respecto a las variables de K	63
Tabla 17. Datos obtenidos de k_w de acuerdo con los dos ensayos realizados	65
Tabla 18. Resultados obtenidos del ensayo 1 para la demanda de cloro	66
Tabla 19. Resultados obtenidos del ensayo 2 para la demanda de cloro	67
Tabla 20. Resultados obtenidos del ensayo 3 para la demanda de cloro.	68
Tabla 21. Tabla resumen de los parámetros identificados.	70
Tabla 22. Resultados de la cantidad en Kg de Hipoclorito de Calcio	73

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios y a San Judas Tadeo por brindarme la sabiduría y la perseverancia necesarias para recorrer este camino y culminar con éxito mi carrera.

Quiero expresar un agradecimiento especial al Ing. Fausto García por su apoyo constante y las valiosas enseñanzas impartidas durante la realización de este proyecto. De igual manera, le agradezco al Dr. Larriva por su colaboración al facilitarnos los equipos e instrumentos de medición, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, extendiendo mi sincero agradecimiento a la Ing. María del Carmen Pacheco, cuyo respaldo y guía fueron esenciales para la culminación exitosa de este trabajo.

A mis queridas amigas Ale, Elvia, Jessy, Hilda, Andrea, Belén y Cinthy, y a mis amigos Rommel, Alex, John y Anthony, les estoy profundamente agradecida por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Finalmente, quiero agradecer con todo mi amor a mis padres, Marianita y Genovanny, quienes con su cariño y ejemplo han sido mi mayor inspiración. Gracias a ustedes, he logrado culminar una de las etapas más significativas de mi vida.

A todos aquellos amigos, amigas y familiares que, con una palabra de aliento, me dieron la fuerza para no rendirme, ¡muchas gracias!.

Evelin Andrea Aguilar Chuya

Agradezo a todas aquellas personas que nos colaboraron y apoyaron en el desarrollo del presente trabajo de investigación. De manera especial a nuestro tutor, quien nos supo apoyar y compartir sus conocimientos para culminar de manera exitosa el presente trabajo de investigación.

De la misma manera, agradezco a mi familia especialmente a mis abuelos, quienes desde pequeño me supieron impartir valores que me han servido para salir en adelante y no darme por vencido, a mi mamá por ser un ejemplo de lucha y perseverancia, y a mi hermano quien fue mi apoyo y consejero en esta última parte de mi etapa universitaria.

Finalmente a mis amigos, gracias por su apoyo incondicional, les estaré eternamente agradecido y siempre les estaré deseando éxitos y brindando mi apoyo cuando lo necesiten.

Joseph Ricardo Chuñir Chillogallo

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a dos de las personas más importantes de mi vida, mis queridas hermanas Fátima y Camila, quienes son mi mayor admiración y orgullo. Ustedes han sido un pilar fundamental en esta travesía; gracias por su apoyo incondicional y por sacarme siempre una sonrisa.

A mis amadas Marianitas, este logro es por ustedes, mujeres valientes que me enseñaron el verdadero valor de la perseverancia y a nunca rendirse ante nada. A mis queridas ñañas y ñaños, gracias por todo su amor, y por confiar siempre en mí.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que estén atravesando momentos difíciles. Recuerden que los sueños sí se cumplen y que superar los obstáculos nos convierte en personas más fuertes. Nunca olviden que no están solos; siempre habrá alguien dispuesto a brindarles su apoyo incondicional.

Evelin Andrea Aguilar Chuya

Este logro se lo dedico en primer lugar al angelito que desde el cielo me ha estado cuidando, a ti abuelo, cuanta falta nos haces. Fuiste un ejemplo para mí y una de las personas que me incentivó a seguir una carrera universitaria que hoy la estoy finalizando, lástima que la vida tenía otros planes para ti y no me permitió festejar este logro junto a ti.

A mi madre, que siempre soñaste en reflejar en tus hijos aquellos sueños que algún día tuviste y que hoy son una realidad. Espero que con este logro te sientas orgullosa de ti misma por todo lo que has logrado, por lo que nos has enseñado y por todo el esfuerzo que has hecho por ver a tus hijos salir en adelante, deseo de corazón hacer lo mismo por ti.

Finalmente, a toda mi familia y amigos que siempre han estado ahí para brindarme su apoyo, este logro también es de ustedes.

Joseph Ricardo Chuñir Chillogallo

1 Capítulo I: Introducción

1.1 Antecedentes

La planta de tratamiento de agua potable Tutupali Chico (PTAP-TC) está administrada por la empresa pública ETAPA EP, su método de tratamiento está basado en procesos de filtración lenta, integrado por filtración de grava y filtración de arena, complementada por el proceso de desinfección mediante cloro gaseoso, el cual es una técnica de desinfección utilizada comúnmente debido a su buena efectividad para la eliminación de microorganismos patógenos.

El abastecimiento de agua potable es una necesidad básica y fundamental para la población. Sin embargo, en algunas comunidades rurales como Tutupali Chico, la calidad del agua puede verse afectada por diversos factores, lo que representa un riesgo para la salud pública. Una de las formas más comunes de desinfección del agua es mediante la cloración, proceso que implica la adición de cloro al agua para eliminar microorganismos patógenos.

No obstante, es importante controlar adecuadamente la dosis de cloro aplicada, ya que una concentración excesiva puede generar subproductos de la desinfección dañinos, mientras que una dosis insuficiente no garantiza la desinfección efectiva. Por ello, se ha visto la necesidad de estudiar el comportamiento cinético del cloro libre en el sistema de agua potable de Tutupali Chico, con el fin de optimizar la dosificación de cloro y asegurar la calidad del agua suministrada a la población.

Estudios previos en otras localidades han demostrado que diversos factores como el pH, la temperatura, el tiempo de contacto y la demanda de cloro del agua, pueden influir en el comportamiento del cloro libre y en su eficacia desinfectante. Por lo tanto, es importante analizar estas variables en el contexto específico del sistema de agua potable de Tutupali Chico para desarrollar estrategias de dosificación de cloro más eficientes y seguras.

1.2 Problemática

En las zonas rurales el adecuado tratamiento de agua cruda para consumo humano es un factor importante que afecta su desarrollo en términos de saneamiento. A menudo estas áreas se ven marginadas en la implementación y renovación de instalaciones adecuadas para el tratamiento de agua potable.

La escasez de información sobre las fuentes de abastecimiento y los procesos adecuados que deben llevarse a cabo de manera independiente en cada Planta de Tratamiento de Agua

Potable (PTAP) ha generado interés en evaluar y optimizar estos procesos sin la necesidad de realizar inversiones considerables. Estas evaluaciones se enfocan principalmente en el estudio de las variables que pueden afectar a la eficiencia en los procesos de tratamiento.

Un ejemplo es el proceso de cloración, muy utilizado en las PTAP de zonas rurales por su accesibilidad económica y alta eficiencia en la desinfección. Sin embargo, una aplicación inadecuada de este proceso puede generar subproductos como trihalometanos y ácidos haloacéticos, los mismos que son nocivos para la salud humana (Romero, 2000).

Aunque el uso de cloro permite una desinfección adecuada dentro de la PTAP, a lo largo de la red de distribución pueden presentarse factores que alteren la calidad del agua en las tuberías. Entre estos factores se encuentran la temperatura, la luz solar, las reacciones con el nitrógeno orgánico y las reacciones con fenoles (Romero, 2009). Por ello, la evaluación del cloro residual a lo largo de la red es un buen indicador para diagnosticar y verificar la ausencia de estos problemas (OMS, 2009).

1.3 Justificación

El proceso de desinfección con cloro es el proceso que se usa con mayor frecuencia en la actualidad debido a las ventajas que presenta, como son: su alta eficiencia en la eliminación de organismos patógenos, facilidad de aplicación y el efecto residual que produce, mismo que, puede ser utilizado en la evaluación de los sistemas de distribución. Sin embargo, también presenta algunas desventajas, como son: su corrosividad y la posibilidad de formar subproductos potencialmente peligrosos para la salud del ser humano (Arboleda et al., 2023). Por otra parte, el cloro gaseoso, es el tipo de cloro que generalmente se usa en procesos de potabilización pequeños por su eficiencia en el consumo, dado que en una misma dosis consume una menor cantidad de producto, por ejemplo, a comparación del hipoclorito de calcio y además presenta una gran facilidad de uso, pues no requiere ser diluido (Lozano & Lozano, 2015).

Por lo antes mencionado, fue necesario desarrollar un estudio que permita optimizar el proceso de dosificación de cloro de la PTAP-TC. De manera que se asegure el cumplimiento de los parámetros de calidad y los niveles de concentración de cloro residual determinados dentro de la normativa ecuatoriana. Además, el desarrollo del presente estudio permitió determinar el orden de reacción y las constantes cinéticas del cloro a nivel de la red de distribución.

Por otra parte, al tratarse de una PTAP ubicada en una zona rural y estar a cargo de una institución pública, se ha presentado situaciones en las cuales el desabastecimiento de cloro

gaseoso ha durado largos periodos. Esto ha llevado a la necesidad de cambiar el uso de cloro gas por hipoclorito de calcio. Sin embargo, la dosificación empleando se realiza de manera empírica. Por este motivo, el presente estudio evaluó la dosis óptima a través de la metodología de cloración por punto de ruptura o punto de quiebre.

Los resultados del estudio favorecerán el proceso de desinfección, dado que, el operario contará con información necesaria para realizar una dosificación óptima de cloro a nivel de la planta, permitiendo mejorar la calidad del tratamiento del agua y evitando la dosificación bajo criterios empíricos de operación. Además, la determinación del orden de reacción y las constantes cinéticas de reacción de cloro posibilitará el desarrollo de futuras investigaciones dirigidas a mejorar el sistema de tratamiento de agua potable de Tutupali Chico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar las constantes cinéticas de reacción del cloro libre y optimizar la dosificación del cloro del sistema de agua potable de Tutupali Chico.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el orden de reacción de la constante cinética del cloro mediante un análisis de datos experimentales.
- Determinar el valor correspondiente a la constante de reacción del cloro con el agua (k_b), y la constante de reacción del cloro con la pared (k_w) propias de la red de distribución.
- Mejorar la eficiencia en la dosificación de cloro en la planta de tratamiento de agua potable mediante un proceso de optimización.

2 Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Calidad del agua potable y características del cloro

2.1.1 Potabilización del agua

El agua potable se define como aquella agua apta para ser bebida o consumida por el ser humano. Se debe tener en cuenta que, este concepto engloba diversos usos domésticos como lo son la higiene y el aseo personal (Garros & Safar, 2020). El objetivo principal de la purificación del agua es proveer a toda la sociedad de agua potable libre de organismos patógenos, cubriendo así sus necesidades básicas y garantizando su derecho de acceso al agua de buena calidad (Romero, 2000). En la tabla 1, se resumen los principales procesos utilizados en las plantas potabilizadoras de agua:

Tabla 1. Tipos de procesos implementados comúnmente para la potabilización del agua

Tratamiento Preliminar	
Proceso	Función
Cribado	Remueve los desechos grandes que podrían obstruir o dañar el equipamiento de la planta.
Pretratamiento químico	Remoción eventual de algas que causan sabor, olor y color.
Presedimentación	Remoción de grava, arena, limo, entre otros materiales sedimentables.
Aforo	Forma de medición de agua cruda que se va a tratar.
Tratamiento Principal	
Proceso	Función
Aireación	Adición de oxígeno para remover el olor o posibles gases disueltos del agua.
Coagulación / Floculación	Adición de sustancias químicas o naturales para sedimentar los sólidos disueltos.
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables.
Ablandamiento	Remoción de la dureza.
Filtración	Remoción de sólidos de menor tamaño, de los flóculos en suspensión y de la mayoría de los microorganismos.
Adsorción	Remoción del color y de sustancias orgánicas.
Estabilización	Prevención de incrustaciones y corrosión.
Desinfección	Eliminación de patógenos.

Nota. Tomado de Romero (2009).

En las zonas rurales, generalmente se implementan plantas potabilizadoras de agua convencionales que constan de un pretratamiento, un tratamiento principal y finalmente un proceso de desinfección. Para este último proceso, como sustancia desinfectante se utiliza comúnmente cloro gaseoso ó a granel (Comisión Nacional del Agua, 2007).

A continuación, se describen los principales procesos que forman parte de la PTAP de Tutupali Chico objeto del presente trabajo:

- **Filtro grueso de flujo ascendente:** forma parte de los prefiltros cuya función es retener sólidos suspendidos. Su composición se basa en varias capas de grava dispuestas en serie, con diámetros que van desde 25 mm hasta 4 mm, según sea la dirección del flujo. Se pueden emplear cinco o más capas, una sobre la otra. Para una mejor visualización de este sistema obsérvese la Figura 1 (Lozano-Rivas & Lozano Bravo, 2015).

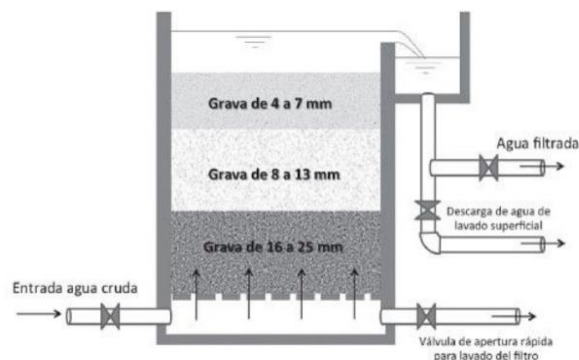


Figura 1. Filtro grueso de Flujo Ascendente. Fuente: Lozano-Rivas & Lozano Bravo (2015).

- **Filtro lento de arena:** su función principal es la eliminación de la turbiedad del agua. Su proceso consiste en filtrar el agua lentamente por medio de una capa porosa de arena (Figura 2). En la superficie del medio filtrante se forma una capa de material orgánico (algas, diatomeas, plancton) (Comisión Nacional del Agua, 2007). Su eficacia radica en la separación de la mayor cantidad de materia en suspensión a excepción de las arcillas finas, sin embargo, se obtiene una reducción entre el 98 al 99 % de bacterias (Weber, 1979).

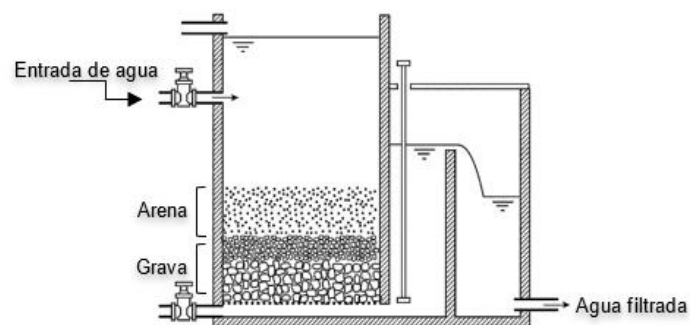


Figura 2. Esquema de un filtro lento de arena. Fuente: Adaptado de Bruni & Spuhler (2018).

- **Desinfección:** la cloración es uno de los métodos más utilizados en la eliminación de patógenos que ponen en riesgo la salud de las personas. Los cloradores gaseosos a presión por lo general son recomendables para zonas donde no se dispone de una fuente de electricidad. Su sistema consta de un diafragma activado por un regulador a presión y un rotámetro que indica la tasa de flujo de cloro, como se observa en la figura 3 (Solsona & Méndez, 2002).



Figura 3. Dosificador de cloro a presión.

2.1.2 Sistemas de distribución de agua potable

Una red de distribución de agua suministra a los usuarios la cantidad de agua demandada, manteniendo una presión adecuada en las tuberías que lo conforman. Los componentes principales de este sistema son las tuberías de distribución, los tanques de almacenamiento y las estaciones de bombeo. Los tramos de la red tienen un diámetro constante, además de válvulas, tanques de almacenamiento y bombas. Los nodos son los extremos de la tubería, aquellos de los que se conoce su flujo de entrada o salida son los llamados nodos de unión. Las válvulas de control regulan el flujo o la presión del agua que fluye a través de las tuberías (Mays, 2011).

El flujo de agua que circula a través de las tuberías de una red ramificada depende de los caudales que abastece a las acometidas de los usuarios. Una desventaja significativa de la red ramificada es que, la rotura de una tubería puede interrumpir el servicio de agua a alguna de las acometidas. En la figura 4, la numeración del 1 al 8 corresponden a los nodos que conectan la red de agua con los domicilios de los usuarios, mientras que el número 0 representa el lugar de alimentación de la red. Por ejemplo, una rotura en el tramo de la tubería que conecta el nodo 3 con el nodo 6 interrumpirá el servicio de agua tanto para el nodo 6 como para el nodo 8 (Sánchez Calvo et al., 2017).

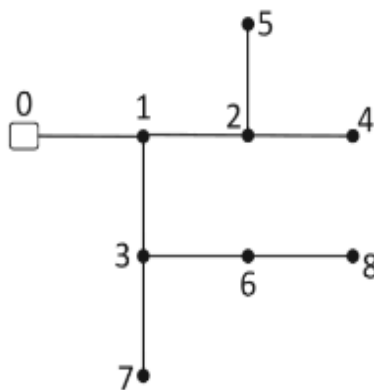


Figura 4. Esquema de una red de distribución de agua potable. Fuente: Sánchez Calvo et al. (2017).

2.2 Cloración del agua

2.2.1 Métodos de dosificación

La desinfección mediante cloro gaseoso es una tecnología económica y la más usada a nivel mundial. Los dosificadores funcionan al vacío por inyección en la tubería y a presión mediante difusores. El clorador al vacío es un sistema conformado por el cilindro de cloro gaseoso, un rotámetro y un eyector tipo Venturi. Su funcionamiento se basa en la acción del flujo de gas hacia el tanque de mezcla donde el gas se dispersa y disuelve. En cambio, un clorador a presión tiene un diafragma activado por un regulador a presión y un rotámetro que indica la tasa de flujo del cloro (Solsona & Méndez, 2002).

2.2.2 Características del cloro y sus compuestos derivados

En la potabilización del agua, el agente desinfectante comúnmente utilizado es el cloro. Comercialmente, el cloro se presenta en varias formas: como gas (Cl_2) almacenado en cilindros a presión, en estado líquido como hipoclorito de sodio (NaClO), y en partículas sólidas como hipoclorito de calcio. En la tabla 2 se describen las características, el porcentaje de cloro y los tipos de envases en los que usualmente se presenta el cloro según su forma de presentación. Se observa que el cloro gaseoso tiene el mayor porcentaje de contenido de cloro, con un 99.8 %, en comparación con el hipoclorito de sodio, que contiene entre un 1 % y un 15 % de cloro (Romero, 2009).

Tabla 2. Clasificación y descripción de los tipos de cloro

Tipo de compuesto	Característica	Contenido de cloro (%)	Envase comercial
Cloro gaseoso (Cl ₂)	- Gas licuado a presión. - Su estabilidad en el tiempo es buena. - Gas altamente tóxico.	99.8	Cilindros de 40 y 70 Kg.
Hipoclorito de calcio Ca(ClO) ₂	- Polvo en forma granulada o tabletas. - Estable - Susceptible a una posible combustión al entrar en contacto con sustancias orgánicas.	65 - 70	Latas, tambores o baldes plásticos de 15.45 y 135 Kg.
Hipoclorito de sodio (NaClO)	- Líquido de color amarillo pálido. - A concentraciones mayores a 7 % decae su potencia rápidamente.	1 - 15	Diversos tamaños de recipientes plásticos y botellas.
Cal clorada	- Polvo de color blanco. - Ante la presencia de luz solar o altas temperaturas puede deteriorarse rápidamente.	15 - 35	Tambores de 45 a 135 Kg. Bolsas de 25 a 40 Kg.

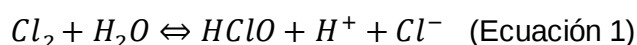
Nota. Tomado de Comisión Nacional del Agua (2007).

2.2.3 Reacciones del cloro con el agua

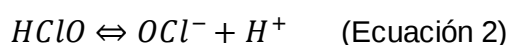
De acuerdo con lo expuesto por Romero (2009), cuando el cloro en su estado sólido, líquido o gaseoso reacciona directamente con las moléculas de agua, se producen las siguientes situaciones:

- Cloro gaseoso, Cl₂:

El cloro en su forma gaseosa, al reaccionar con el agua, genera ácido hipocloroso (HClO) junto con iones de hidrógeno y cloro, expresándose de la siguiente manera:

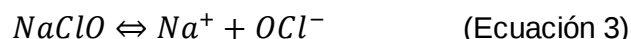


En la reacción anterior, la formación del ácido hipocloroso provoca una sustancial disminución del pH en el agua. Dado que, este ácido se ioniza produciendo el ion hipoclorito, lo que resulta en un pH alcalino:

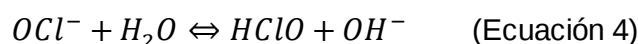


- Hipoclorito de sodio, NaClO:

Si se utiliza como desinfectante el hipoclorito de sodio, su reacción se expresa como:

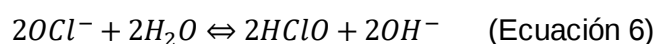


Entonces, al reaccionar el ion hipoclorito con el agua se tiene:



- **Hipoclorito de calcio, $Ca(ClO)_2$:**

Al agregar hipoclorito de calcio, su reacción con el agua se expresa como:



Como se observa en las reacciones anteriores, cuando el pH del agua es bajo se impide la disociación del HClO. A un $pH \leq 6$ predomina el residual del HClO, mientras que, cuando el pH es de 7.7 la presencia de estos residuales es comparable a la de los residuales del ion hipoclorito. A un $pH \leq 9$, solo se presentan residuales del ion hipoclorito. La efectividad de eliminación de *Escherichia coli* por parte del ácido hipocloroso es de 80 a 100 veces mejor que la del ión hipoclorito (Romero, 2009).

2.2.4 Subproductos de la reacción del cloro con el agua

Durante el proceso de cloración, además de su efectividad en la eliminación de patógenos, su reacción con la materia orgánica puede dar lugar a la formación de subproductos nocivos para la salud. El tipo y la cantidad de estos compuestos dependen de parámetros como la dosis de cloro, la temperatura, el pH y el tiempo de contacto (Ramírez, 2005). Los subproductos principales son los trihalometanos (THMs), que incluyen el cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo. Otros subproductos que se presentan en una cantidad significativa son los ácidos haloacéticos (AHA). La presencia de materia orgánica es la causa principal de la formación de los subproductos, desde el momento de la cloración del agua hasta su posterior decaimiento al fluir por las tuberías de la red de suministro (Rodríguez et al., 2007).

2.2.5 Factores influyentes en la cloración

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2007), los factores principales que intervienen en la eficiencia de la cloración son:

- **Tiempo de contacto:** durante el proceso de desinfección es importante el tiempo disponible para que el cloro inhiba la actividad microbiana. Para el caso del agua potable se recomienda un tiempo de contacto entre 10 a 15 minutos. Según sea la concentración del desinfectante mientras mayor sea el tiempo de contacto mejor será la efectividad de desinfección (Comisión Nacional del Agua, 2007). Este evento se da de acuerdo con la ley de Chick que establece la ecuación 7:

$$\frac{dN}{dt} = -kN_t \quad (\text{Ecuación 7})$$

En esta ecuación, N_t representa el número de microorganismos en un tiempo t y k es la constante de inactivación.

- **Temperatura:** para eliminar los microorganismos mediante la dosificación de cloro, lo ideal es tener una temperatura alrededor de los 21 °C para tener un efecto más rápido. Sin embargo, la estabilidad del cloro se da a bajas temperaturas lo que compensa la menor velocidad de desinfección con una mayor duración de la concentración de cloro en el agua (Comisión Nacional del Agua, 2007).
- **pH:** su efecto es más directo en el cloro residual. El agua a un pH alto requiere una mayor dosificación de cloro. El agua de un pH 6.5 y con una temperatura de 21 °C una concentración de 0.3 mg/L de cloro residual provoca un efecto letal en la totalidad de las bacterias (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Otro factor importante es la turbidez, ya que la desinfección con cloro pierde su eficiencia cuando el agua presenta altos niveles de turbidez. Es un indicador de la presencia de partículas coloidales, de origen mineral u orgánico. Estos niveles elevados de turbidez pueden actuar como una barrera protectora para los microorganismos, evitando su eliminación durante la cloración del agua (Marcó et al., 2004).

2.3 Cinética química del cloro

2.3.1 Orden de reacción

La evolución de la concentración, tanto de los reactivos como de los productos respecto al tiempo permite analizar el comportamiento cinético de una reacción (Estrin et al., 2024). El orden de reacción se refiere a cómo la velocidad de una reacción química depende de las concentraciones de los reactivos; específicamente, es la suma de los exponentes a los que están elevadas las concentraciones de los reactivos en la ecuación de la velocidad de reacción (Da Silveira, 2015). La expresión de la velocidad de reacción (Ecuación 8) incluye

los valores exponenciales que representan los órdenes de reacción y que se determinan de manera experimental.

$$v = k[A]^x[B]^y[C]^z[D]^w \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

- v representa la velocidad de reacción.
- k es la constante de velocidad.
- $[A]$, $[B]$, $[C]$, $[D]$ son las concentraciones de los reactivos A, B, C, D, respectivamente.
- x , y , z , w representan el valor del orden de reacción de los reactivos.

El método integral es ampliamente utilizado para determinar el orden de reacción, a través de la tendencia lineal de las gráficas de concentración en función del tiempo (Estrin et al., 2024). Tal como lo resalta Fogler (2011) demostrando que este método utiliza un proceso de ensayo y error para obtener el orden de reacción.

2.3.2 Clasificación del orden de reacción

2.3.2.1 Reacción de orden cero

Es aquella reacción que presenta una velocidad independiente de la concentración de los reactantes. Su velocidad es dependiente de la constante de velocidad representada por k (Da Silveira, 2015). Según House (2007) la velocidad de reacción se expresa por la ecuación 9:

$$v = k \quad (\text{Ecuación 9})$$

Al integrar la ecuación 10, se tiene como resultado la ecuación 10.

$$[A] = [A]_0 - kt \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde, $[A]$ es la concentración del reactivo A en un tiempo t , y $[A]_0$ representa la concentración del reactivo en el tiempo inicial ($t = 0$). En la figura 5, se demuestra que la variabilidad de la concentración de A respecto al tiempo es lineal y muestra una disminución constante.

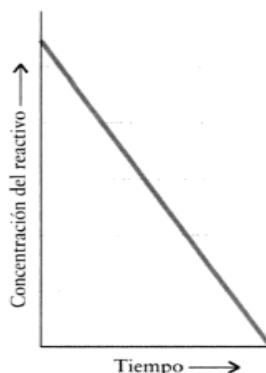


Figura 5. Representación lineal de una reacción de orden cero. Fuente: Atkins & Jones (2006).

2.3.2.2 Reacción de primer orden

Una reacción de primer orden tiene una velocidad de reacción que depende de la concentración de un solo reactante (Ecuación 11). Por lo que, es conocida como una reacción unimolecular (Da Silveira, 2015).

$$v = k[A] \quad (\text{Ecuación 11})$$

Según House (2007) al integrar la ecuación 11 se obtiene la ecuación 12:

$$-\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = k \int_0^t dt \quad (\text{Ecuación 12})$$

Al resolver los dos lados de la igualdad, se obtiene la ecuación 13.

$$\ln[A]_0 - \ln[A] = kt \quad (\text{Ecuación 13})$$

Reordenando la ecuación 13 se expresa como la ecuación 14:

$$\ln[A] = \ln[A]_0 - kt \quad (\text{Ecuación 14})$$

ó, al aplicar en la ecuación 14 el inverso del logaritmo natural, se obtiene la ecuación 15:

$$[A] = [A]_0 e^{-kt} \quad (\text{Ecuación 15})$$

La ecuación 14 tiene similitud a la forma de la ecuación lineal $y = b + mx$, siendo $y = \ln[A]$, $m = -k$, y $b = \ln[A]_0$. Por lo tanto, al aplicar los datos de la concentración de A respecto al tiempo, se obtiene una gráfica similar a la figura 6.

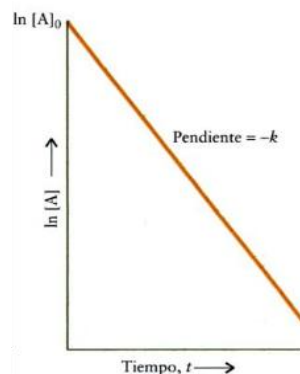


Figura 6. Representación lineal de una reacción de primer orden. Fuente: Atkins & Jones (2006).

2.3.2.3 Reacción de segundo orden

Da Silveira (2015) explica que para una reacción de segundo orden la velocidad de reacción puede depender de la concentración elevada al cuadrado de un solo reactivo ó de dos reactivos diferentes. La ecuación general de la velocidad para una reacción de segundo orden se puede expresar por la ecuación 16:

$$v = k[A]^2 \quad (\text{Ecuación 16})$$

Para linealizar la ecuación anterior, según lo menciona House (2007) se debe integrar la ecuación 17 entre los límites de concentración de $[A]$ en $t=0$ y $[A]$ en un tiempo t :

$$-\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]^2} = k \int_0^t dt \quad (\text{Ecuación 17})$$

Entonces de la resolución de la ecuación 17, se obtiene la ecuación 18 que al reordenarla da como resultado la ecuación 19.

$$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt \quad (\text{Ecuación 19})$$

Al graficar $1/[A]$ en función del tiempo, se debe obtener una línea recta con una pendiente k y una intersección de $1/[A]_0$. Este gráfico, similar a la figura 7, demuestra que la reacción es de segundo orden.

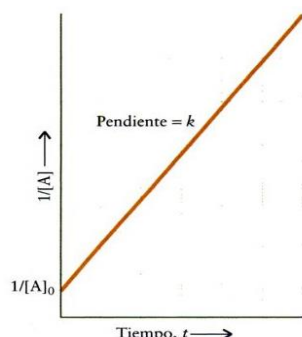


Figura 7. Representación lineal de una reacción de segundo orden. Fuente: Atkins & Jones (2006).

2.4 Coeficientes de reacciones que influyen en el decaimiento de cloro

2.4.1 Coeficiente global de decaimiento, K

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2008), el coeficiente de decaimiento total del cloro se expresa por la ecuación 20:

$$K = k_b + \frac{2k_w k_f}{r(k_w + k_f)} \quad (\text{Ecuación 20})$$

donde k_f representa el coeficiente de transferencia de masa entre el flujo del agua y la pared, r es el radio de la tubería, k_b es la constante cinética de reacción del cloro con el agua y k_w es la constante cinética de reacción del cloro con la pared de la tubería. Para obtener el valor de k_f , se relaciona el número de Sherwood (Sh) con los valores del diámetro (d) de la tubería y la difusión molecular (D) del cloro en el agua, cuyo valor es $1.25 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. De esta manera se tiene la ecuación 21:

$$k_f = Sh \frac{D}{d} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Teniendo como ecuación de Sherwood:

$$Sh = 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.333} \quad \text{cuando } Re > 2300 \quad (\text{Ecuación 22})$$

y,

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0688 \left(\frac{d}{L}\right) Re Sc}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{d}{L}\right) Re Sc\right]^{\frac{2}{3}}} \quad \text{cuando } Re \leq 2300 \quad (\text{Ecuación 23})$$

donde Re es el número de Reynolds, L la longitud de la tubería y Sc el número de Schmidt.

Para calcular Sc , se utiliza la ecuación 24:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (\text{Ecuación 24})$$

donde:

- ν representa la viscosidad cinemática (m^2/s).

2.4.2 Constante cinética de reacción del cloro con el agua, k_b

El cloro reacciona con sustancias orgánicas al entrar en contacto con el agua, por ello durante el flujo del agua se genera un decaimiento del cloro que se representa mediante el coeficiente k_b . Su medición se basa en la toma de muestras de agua de puntos estratégicos como tanques de reserva, y los domicilios ubicados en los distintos tramos de la red. Su obtención es efectiva si se analizan las muestras en periodos de tiempo que permitan obtener una mayor cantidad de datos para determinar el decaimiento real del cloro en una red de distribución. Al aplicar un método de ajuste a los datos obtenidos de la concentración de cloro residual, se analiza el k_b mediante la ecuación 25 (Comisión Nacional del Agua, 2008):

$$C = C_o e^{-k_b t} \quad (\text{Ecuación 25})$$

donde:

C : concentración de cloro residual (mg/L) en un tiempo t .

C_o : concentración inicial del cloro (mg/L) cuando t es igual a 0.

t : tiempo reacción (horas).

k_b : constante de reacción del cloro con el agua (h^{-1}).

2.4.3 Constante cinética de reacción del cloro con la pared de la tubería, k_w

La constante de reacción del cloro con la pared se refiere a la tasa de descomposición del cloro en relación con las paredes de la tubería. Esta tasa depende del espesor de la biopelícula, la edad y el tipo de material de la tubería (Jamwal & Kumar, 2016).

Además, según lo mencionado por Rossman et al. (1994), la pared de la tubería presenta una concentración de cloro (C_w) que es diferente de la concentración del cloro en el agua que fluye a través de la tubería (C). Generalmente, se trata de una reacción de primer orden, que se interpreta según la ecuación 26:

$$\frac{dC_w}{dt} = k_w C_w \quad (\text{Ecuación 26})$$

siendo k_w la constante cinética de reacción del cloro con la pared de la tubería expresada en s^{-1} y C_w la concentración del cloro que se encuentra adherida a la pared. Sin embargo, la complejidad de su cálculo directo es una limitación, por lo que se recomienda utilizar la ecuación 27 para determinar su valor.

$$K = k_b + k_w \quad (\text{Ecuación 27})$$

2.5 Optimización de la dosificación del hipoclorito de calcio

2.5.1 Demanda de cloro

La demanda de cloro es la cantidad de cloro con la que reacciona la materia orgánica y las sustancias reductoras. Es la cantidad mínima de cloro que se necesita para eliminar los microorganismos del agua después de la reacción inicial del cloro con el resto de las sustancias presentes en el agua (Comisión Nacional del Agua, 2007). Según Hauser (2002), la demanda de cloro se describe como la diferencia entre la dosis de cloro aplicada y la cantidad de cloro residual. Esto se expresa en la ecuación 28:

$$\text{Demanda de cloro} = \text{Dosis de cloro} - \text{Cloro Residual} \quad (\text{Ecuación 28})$$

El cloro residual que fluye en las tuberías del sistema de distribución, con el tiempo se disipa y decae ya que la desinfección continúa luego de la salida del agua clorada en la PTAP. En los sistemas de distribución se tiene como objetivo mantener una concentración necesaria de cloro libre residual con el fin de garantizar la desinfección del agua (Hauser, 2002). La presencia de materia orgánica en el agua provoca un aumento progresivo en la demanda de cloro con el tiempo. No obstante, un mayor valor de turbiedad incrementa la velocidad de la demanda de cloro debido al aumento del contenido de amoníaco (Valencia, 2000).

2.5.2 Punto de quiebre

En cada PTAP se debe determinar su propia curva de demanda de cloro. El análisis del agua para las distintas formas de cloro en diferentes dosis permite obtener la dosis óptima de cloro (AWWA Staff, 2006). Al distribuir una muestra de agua en frascos individuales con un volumen determinado en cada uno, se añaden cantidades crecientes de cloro y, tras esperar un tiempo de contacto, se obtiene la relación entre la concentración de cloro aplicado y la concentración de cloro residual. Al representar gráficamente esta relación, se obtiene una curva que muestra que, a medida que incrementa la dosis de cloro, el cloro residual también aumenta. Sin embargo, llega a un punto en el que la curva cambia de dirección y empieza a descender, indicando que a una menor concentración de cloro añadido genera un residual más bajo. De esta manera, se determina el punto de quiebre, que es el valor mínimo a partir del cual la curva nuevamente asciende, mostrando una proporcionalidad directa entre el cloro añadido y el residual (Valencia, 2000).

En la figura 8 se observa que, cuando se agrega una cantidad mínima de cloro, éste reacciona u oxida el manganeso, hierro y el nitrito, sin producirse desinfección alguna, por lo que los residuos de cloro serán nulos. Al añadir una cantidad representativa de cloro, entre 0.2 a 0.5 g, ocurre una reacción significativa con los compuestos orgánicos, lo que provoca la

formación de amoníaco y cloraminas. Las cloraminas son responsables de producir el cloro residual combinado, que ha perdido su poder de desinfección debido a su combinación con otros compuestos. Cuando la curva desciende, las cloraminas se destruyen, alcanzando así el punto de quiebre. Una concentración ligeramente superior a este punto genera cloro libre residual, disponible para mantener una desinfección adecuada del agua. El término “cloro libre residual” se refiere al cloro que aún no ha reaccionado con ningún compuesto, pero que está listo para hacerlo cuando algún agente contaminante entre en contacto con el agua (Pizzi, 2005).

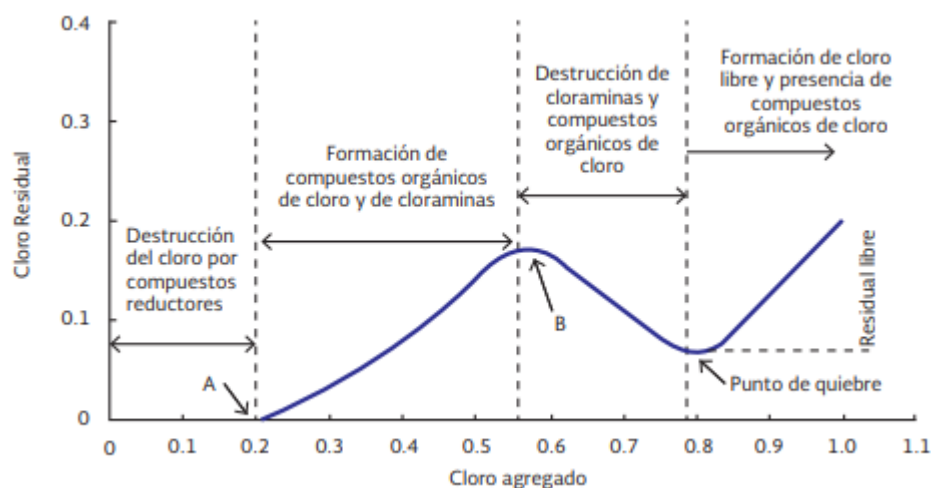


Figura 8. Representación de la curva de demanda de cloro. Fuente: Comisión Nacional del Agua (2007).

2.5.3 Eficiencia en la acción del cloro para destruir patógenos

La formación del ácido hipocloroso (HClO) en el agua es un mecanismo crucial para lograr una desinfección adecuada. El HClO ataca la membrana celular de las bacterias, penetra en su interior e inhibe la replicación del ADN, el desarrollo y la síntesis de proteínas, que son procesos biológicos esenciales para las bacterias. De esta manera, se paraliza el crecimiento de estos agentes contaminantes (Ren & Zhang, 2020). Sin embargo, los virus son más resistentes al cloro en comparación con bacterias como la *Escherichia coli*. Diversos investigadores han encontrado que la dosis de cloro y el tiempo de contacto necesarios para destruir los virus son entre 3 y 100 veces mayores (Figura 9) que los requeridos para eliminar bacterias como *Escherichia coli*, *Aerobacter aerogenes* o *Shigella dysenteriae* (Punmia et al., 1995).

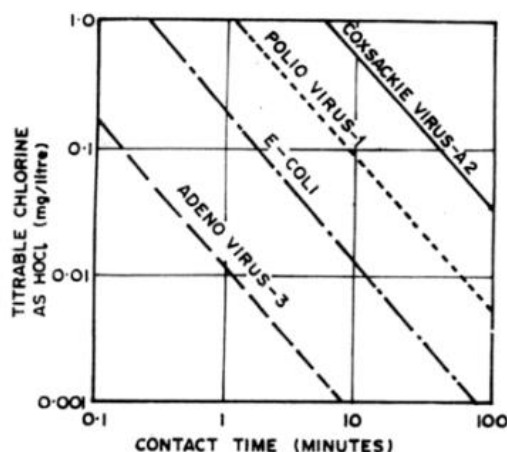


Figura 9. Relación de la concentración de cloro en función del tiempo de contacto para eliminar agentes patógenos. Fuente: Punmia et al. (1995).

Generalmente, cuando la concentración de cloro residual libre es superior a 0.3 mg/L y el tiempo de contacto es igual o superior a 30 min, se destruye la mayoría de las bacterias patógenas, como *Escherichia coli*, las *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella enterica*, entre otras (Ren & Zhang, 2020).

2.6 Normativa Aplicable

El marco legal considerado para el desarrollo del presente trabajo es el siguiente:

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1108:2020. AGUA PARA CONSUMO HUMANO. REQUISITOS

En Ecuador, la calidad del agua destinada al consumo humano está regulada por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108, cuya sexta revisión fue actualizada en el año 2020. Esta norma establece los requisitos del agua para consumo humano y se aplica al agua proveniente de sistemas de abastecimiento, suministrada a través de sistemas de distribución. Entre los requisitos se destaca que el agua para consumo humano debe presentar niveles aceptables de color, turbiedad y cloro libre residual. Asimismo, debe cumplir con los demás parámetros fisicoquímicos especificados en la tabla 3.

Tabla 3. Requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano

Parámetro	Unidad	Límite permitido	Método de ensayo
Arsénico	mg/L	0.01	Standard Methods 3114
Cadmio	mg/L	0.003	Standard Methods 3113
Cloro libre residual	mg/L	0.3 a 1.5	Standard Methods 4500 Cl ⁻
Cobre	mg/L	2.0	Standard Methods 3111

Color aparente	Pt-Co	15	Standard Methods 2120
Cromo (Cromo total)	mg/L	0.05	Standard Methods 3113
Fluoruro	mg/L	1.5	Standard Methods 4500-F ⁻
Mercurio	mg/L	0.006	Standard Methods 3112
Nitratos (como NO ₃ ⁻)	mg/L	50.0	Standard Methods 4500-NO ₃ ⁻
Nitritos (como NO ₂ ⁻)	mg/L	3.0	Standard Methods 4500-NO ₂ ⁻
Plomo	mg/L	0.01	Standard Methods 3113
Turbiedad ^a	NTU	5	Standard Methods 2130

^a Se conoce también como Turbidez.
^b Los resultados obtenidos deben expresarse con el mismo número de cifras significativas de los límites permitidos, aplicando las reglas para redondear números indicados en NTE INEN 52.
^c En el caso de que sean usados métodos de ensayo alternativos a los señalados, estos deben ser normalizados. En el caso de no ser un método normalizado, éste debe ser validado.

Nota. Tomado de INEN 1108:2020.

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 2176:2013. AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO

Esta norma establece las directrices para las técnicas de muestreo que se utilizan con el fin de obtener los datos necesarios para el control de la calidad del agua. En este trabajo curricular, se siguieron los lineamientos especificados en esta norma, dándole especial énfasis al cumplimiento de los procedimientos para la toma de muestras utilizadas en el análisis fisicoquímico del agua.

3 Capítulo III: Metodología

3.1 Área de Estudio

3.1.1 Descripción general de la zona de estudio

La red de distribución de agua potable sobre la cual se llevó a cabo el presente estudio se encuentra ubicada en la comunidad de Tutupali Chico, parroquia Tarqui, cantón Cuenca ubicada a una altitud de 2827 m.s.n.m y situada en coordenadas UTM Zona 17M a 713824 E y 9668858 S. El clima de la zona es determinado por el relieve y algunos factores ambientales. Posee temperaturas que oscilan entre los 12 °C a 20 °C y con un promedio anual de precipitaciones que va desde 500 mm a 2000 mm, mismas que se extienden desde el mes de octubre a noviembre y de febrero a mayo.

En cuanto a su densidad poblacional la comunidad está compuesta por un total de 1230 habitantes. De los cuales aproximadamente 350 usuarios son beneficiarios del sistema de agua potable de Tutupali Chico. En cuanto a las características generales de la red de distribución, representada en la figura 10, cuenta con un tanque de almacenamiento ubicado en la PTAP de Tutupali Chico y un tanque de reserva ubicado en el Barrio La Inmaculada. Por otra parte, la red de distribución posee una variación altimétrica que varía entre los 2930 a 2644 m.s.n.m.

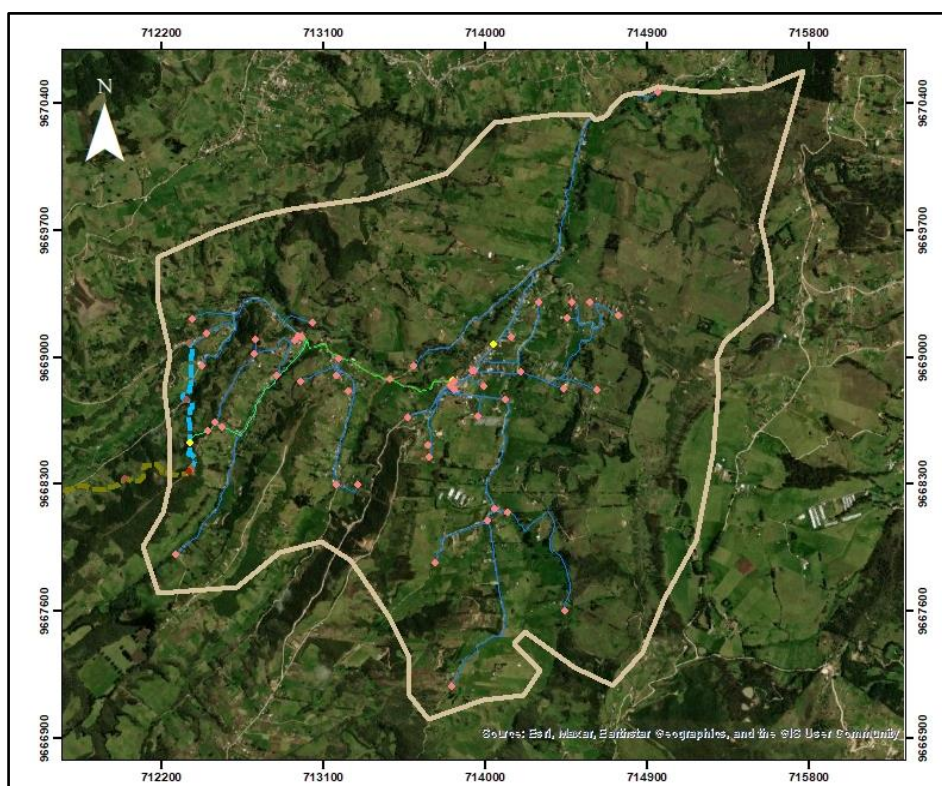


Figura 10. Mapa de la red de Distribución de Agua Potable de Tutupali Chico.

3.1.2 Descripción de la PTAP de Tutupali Chico

La captación del agua cruda proviene de fuentes pertenecientes a la subcuenca del río Tarqui, que tiene una extensión de aproximadamente 45 km² cuyos principales afluentes son Portete, Cumbe, Zhucay, Tutupali y Chaparro. En total, cuatro fuentes suministran de agua cruda a la PTAP de Tutupali Chico, de estas, dos fuentes se conectan mediante tuberías a una caja de captación (Figura 11a), mientras que otra fuente fluye directamente hacia otra caja de captación (Figura 11b). La última fuente es subterránea y se almacena en la estructura sellada de un pozo (Figura 11c). Cabe mencionar, cada una de las fuentes de suministros no están definidas con un nombre específico, sin embargo, estas se encuentran próximas a la quebrada de Rambranpamba.



Figura 11. a) y b) Tanques de captación de las fuentes de agua superficial, c) Tanque de captación de la fuente de agua subterránea.

El agua cruda fluye a través de un tramo de 6 Km desde la captación hasta el ingreso a la PTAP (caseta de control del caudal de entrada). Posteriormente, pasa al sistema de filtración lenta que tiene la capacidad de tratar un caudal de 3 L/s de agua (ETAPA EP, s.f.).

Como proceso preliminar, la planta cuenta con dos unidades de filtros gruesos de flujo ascendente, cada uno compuesto por cinco capas de grava de diámetro entre 1.6 a 25 mm. Estos filtros están conectados a dos unidades de filtración lenta, compuestas de arena con diámetros de 0.15 a 0.30 mm. El agua filtrada fluye hacia la cámara de cloración, donde un dosificador a presión inyecta cloro gaseoso al agua. Luego es direccionada hacia una cámara de mezcla, para finalmente, ser almacenada en un tanque de reserva que tiene una capacidad de 100 m³. En manera de resumen, la figura 12, presenta el proceso de tratamiento de agua cruda, descrita anteriormente. Además, en el Anexo A se adjunta la vista superior del plano de la PTAP de Tutupali Chico.

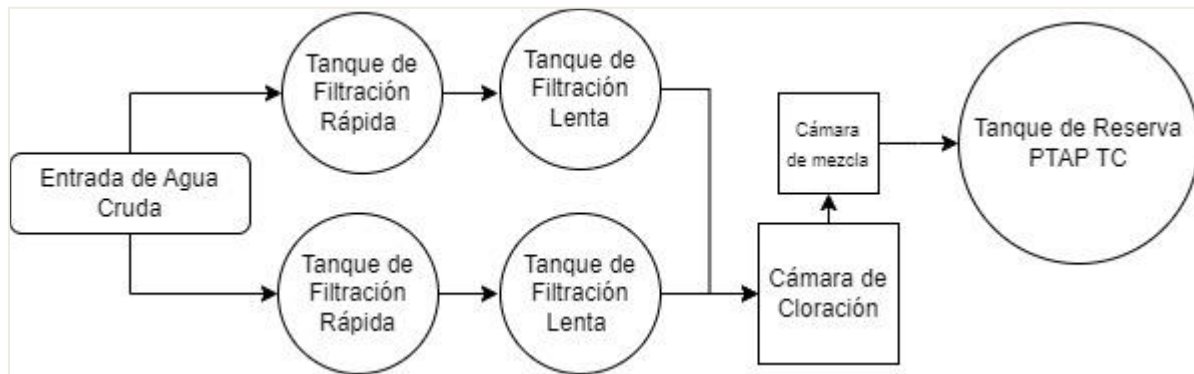


Figura 12. Diagrama del proceso de Tratamiento de Agua Cruda en la PTAP TC.

3.2 Identificación de los puntos de muestreo dentro de la red y toma de muestras

Los puntos de muestreo a lo largo de la red de distribución, como se muestra en la figura 13, fueron seleccionados estratégicamente. Esto se llevó a cabo mediante la revisión detallada de los planos de la red, considerando factores como la longitud total de la red, la cantidad de usuarios y las variaciones de altitud entre la PTAP y los puntos a definir. Este proceso permitió identificar, a través de inspecciones de campo, los puntos óptimos para el muestreo.

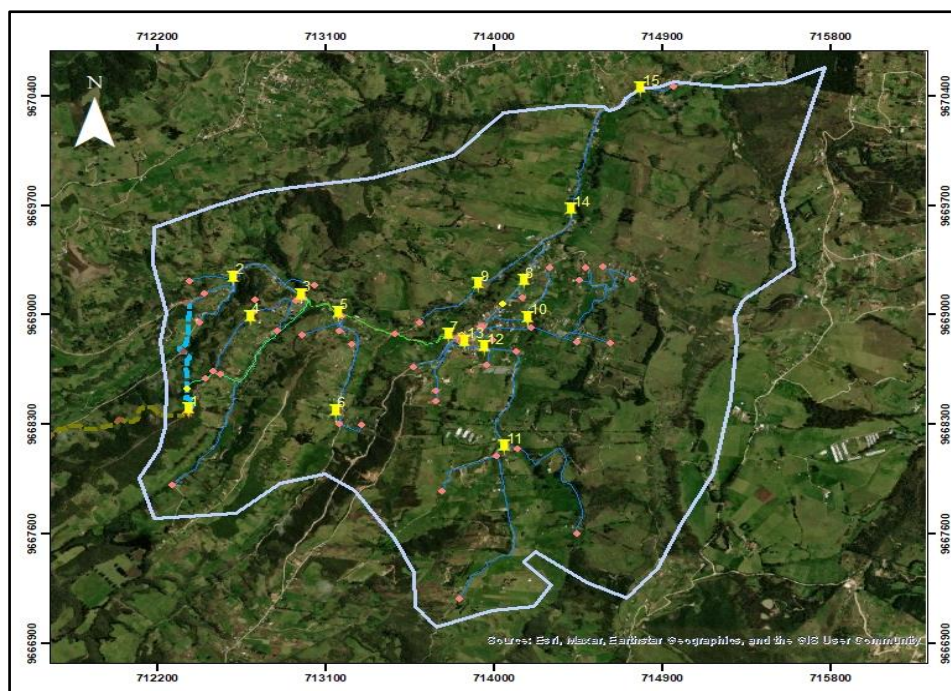


Figura 13. Mapa de los puntos de medición del cloro residual.

En la tabla 4 se representan los puntos de monitoreo seleccionados con sus respectivas coordenadas.

Tabla 4. Número, referencia y coordenadas del sitio de muestreo

N° de Punto	Referencia de punto de Monitoreo	Coordenadas UTM Zona 17M		
		Este	Sur	Altitud
1	Tanque de Reserva PTAP	712363	9668383	2930
2	Barrio Inmaculada	712606	9669228	2790
3	Barrio Cruz Loma	712968	9669116	2789
4	Camino a PTAP Tutupali Chico	712696	9668977	2836
5	Barrio Rosas	713164	9669004	2768
6	Barrio Hera	713153	9668376	2800
7	Entrada Vía a Machay	713752	9668860	2760
8	Canchas Gool Garden	714155	9669203	2731
9	Hacienda Sigüenza	713915	9669184	2735
10	Capulispamba	714179	9668971	2732
11	Barrio Acchayacu	714052	9668148	2740
12	Estadio de Tutupali Chico	713947	9668782	2754
13	Escuela "Francisco Moscoso"	713839	9668817	2764
14	Hacienda San Andrés	714407	9669660	2711
15	Quinta Guillermina	714778	9670433	2703

Las campañas de muestreo para las mediciones de cloro residual, se lo llevó a cabo durante un periodo de seis meses, distribuidos en: tres meses de época de verano, correspondientes a los meses de agosto, septiembre, octubre de 2023 y tres meses de época de invierno, correspondientes a los meses de febrero, marzo y abril de 2024. En donde se recolectaron 15 muestras por mes, con un total de 90 muestras.

Para la toma de muestras se utilizaron envases de polipropileno con una capacidad de 1000 ml, para mantener una temperatura constante de las mismas se utilizó un cooler y gel refrigerante. En cuanto al proceso de toma de muestras, esta se desarrolló siguiendo los lineamientos y recomendaciones establecidas en la normativa ecuatoriana (INEN 2176). Además de que, en cada uno de los puntos de muestreo, se dejó correr el agua por un tiempo de 3 minutos, de manera que, se evite recolectar muestras de agua que hayan permanecido durante mucho tiempo en la tubería.

Por último, las lecturas de cloro residual fueron determinadas mediante el uso del colorímetro de marca HACH, modelo DR 890 y los reactivos para medir cloro libre DPD para muestra de 10 ml (Anexo B). Por otro lado, también se realizó la medición de variables como: la temperatura, pH, turbiedad. En la tabla 5 se presenta la descripción de los equipos utilizados.

Tabla 5. Descripción de los equipos de medición

Imagen	Nombre	Marca/Modelo
 (Sper Scientific Direct, 2020)	Termómetro	Sper Scientific Type K/J Thermometer
 (HACH, 2017)	Turbidímetro	HACH 2100P Turbidimeter
 (BOECO, 2019)	pHmetro	BOECO pH meter MODEL BT - 600
 (HACH, 2015)	Colorímetro	HACH Model DR 890

3.3 Obtención del orden de reacción del cloro

Para determinar el orden de reacción, según lo propuesto por House (2007) se aplicó el método integral, el cual se basa principalmente en la integración de las ecuaciones de velocidad de reacción. Los resultados de la concentración de cloro libre en función del tiempo

se representaron gráficamente mediante el software Excel. Según este proceso, se identificó un comportamiento de orden cero si se observaba una tendencia lineal al graficar la concentración de cloro [A] en función del tiempo. En contraste, se obtuvo una línea recta al graficar el logaritmo natural de la concentración de cloro ($\ln [A]$) con relación al tiempo, dando como resultado una reacción de primer orden. Así mismo, se evaluó el comportamiento de una reacción de segundo orden, para lo cual se graficó el inverso de la concentración ($1/[A]$) respecto al tiempo.

La descripción detallada de las ecuaciones de la velocidad de reacción de orden cero, de primer orden y de segundo orden, se encuentra en la sección 2.3.2.

3.4 Determinación de las constantes cinéticas del cloro (k_b , k_w y K)

3.4.1 Determinación de la constante de reacción del cloro con el agua, k_b

En lo que respecta a la determinación de los valores correspondientes a las constantes cinéticas del cloro, Vidal et al. (1994) propone que el valor correspondiente a la constante de reacción del cloro con el agua (k_b) puede ser calculada mediante un proceso de muestreo, en el cual, como condición fundamental establece que la dosis de cloro inicial debe ser fija y a partir de ello, se debe medir la evolución de la concentración de cloro residual en el transcurso del tiempo.

En base al enunciado anterior, la determinación de la constante de reacción del cloro con el agua se basó en el procedimiento para la toma y procesamiento de datos definido por Mompremier (2015), en donde:

- Como primer paso se recolectó las muestras de agua en recipientes con capacidad de un litro.
- Posteriormente se determinaron los intervalos de tiempo (1 hora) de medición del cloro residual de las muestras de agua.
- El desarrollo del paso anterior permitió obtener los datos correspondientes al decaimiento de cloro en las muestras de agua.
- Por último, a partir de los datos obtenidos en el apartado anterior, se elaboró la curva de decaimiento de cloro para cada uno de los puntos de muestreo. Esto puede realizarse mediante el uso de un software, como puede ser Excel. Cabe mencionar que la curva de decaimiento debe tener un ajuste de tipo exponencial con base en la ecuación 25.

$$C = C_0 e^{-k_b t} \quad (\text{Ecuación 25})$$

3.4.2 Determinación de la constante de interacción del cloro con la pared, k_w

La interacción del cloro con las tuberías es un factor importante por determinar, dado que influye en el decaimiento de cloro a lo largo de las redes de distribución del agua potable (Mompremier, 2015). Según la Comisión Nacional del Agua (2008), el valor correspondiente a la constante de interacción del cloro con la pared de la tubería (k_w) puede ser determinado empleando un ajuste de la ecuación del coeficiente de global (K), representado en la ecuación: $K = k_b + k_w$. De manera que, la constante de interacción del cloro con la pared de la tubería será igual a la diferencia entre el coeficiente global de decaimiento (K) menos el coeficiente de reacción del cloro con el agua (k_b).

3.4.3 Determinación del coeficiente global de decaimiento, K

En lo que respecta al coeficiente global de decaimiento, Alcocer et al. (2004), establece que, para modelar el conjunto de reacción del cloro con el agua y las paredes de la tubería, respectivamente, se emplea el coeficiente global de decaimiento de cloro. Este coeficiente describe el decaimiento total del cloro en un tramo de tubería y se representa a través de la ecuación 29.

$$C = C_o * e^{-K(\frac{L}{v})} \quad (\text{Ecuación 29})$$

En donde:

- C : Concentración de la sustancia al final del tramo, [mg/L].
- C_o : Concentración de la sustancia al inicio del tramo, [mg/L].
- K : Coeficiente de decaimiento total, [h^{-1}].
- L : longitud del tramo, [m].
- v : velocidad del flujo dentro del tramo, [m/s].

De la misma manera, CONAGUA (2008), sugiere que lo recomendable para obtener el valor de la constante de decaimiento a nivel de campo es seguir con el siguiente procedimiento:

- Seleccionar un tramo de tubería que no posea ningún tipo de derivaciones.
- Se sugiere realizar una excavación del tramo seleccionado, en caso de ser necesario.
- Para la determinación del caudal, se deberá colocar dos medidores de gasto, uno al inicio y otro al final, esto con el fin de determinar el caudal que transporta la tubería respectivamente al inicio y final del tramo seleccionado. En caso de que se disponga únicamente un solo medidor, lo recomendable es realizar las mediciones de caudal por un mayor periodo de tiempo. Esto permitirá conocer con mayor detalle la evolución del caudal.

- Para la medición de cloro al inicio y final del tramo, sugiere realizar una perforación e inserción de una válvula en los dos extremos del tramo. Esto con el objetivo de poder determinar los valores correspondientes a la concentración de cloro al inicio y final del tramo.

Además, en el caso de no contar con la posibilidad económica o permisos técnicos para realizar excavaciones, las mediciones de cloro correspondientes al inicio y final del tramo de la tubería se pueden limitar únicamente a ser determinadas en las tomas domiciliarias. Otra recomendación es realizar varias pruebas con el fin de determinar el comportamiento de decaimiento del cloro dentro de la tubería (CONAGUA, 2008).

Por tal motivo, el coeficiente de decaimiento global del cloro fue determinado a partir de múltiples ensayos de campo, en donde como primera instancia se definió un tramo sin derivaciones con un diámetro de tubería constante y longitud conocidas. En dicho tramo se realizó la determinación de la velocidad del agua a través de la tubería, se realizó la lectura de la concentración de cloro al inicio y final de la tubería, para finalmente mediante la aplicación de la ecuación 30 determinar el valor correspondiente al coeficiente de decaimiento global del cloro.

$$K = -\frac{v}{L} \times \ln \frac{C}{C_0} \quad (\text{Ecuación 30})$$

La velocidad del agua a través de la tubería se determinó empleando el siguiente balance:

$$Q = A_{tanque} * V_{tanque} = A_{tubería} * V_{tubería} \quad (\text{Ecuación 31})$$

En donde:

- A_{tanque} : Área del tanque de reserva de la PTAP TC (m²)
- V_{tanque} : Velocidad con la que el agua desciende dentro del tanque (m/s)
- $A_{tubería}$: Área de la tubería de salida (m²)
- $V_{tubería}$: Velocidad del agua a través de la tubería (m/s)

Cabe mencionar que el tramo de tubería determinada para el cálculo del coeficiente de decaimiento global del cloro corresponde a la tubería de salida del tanque de reserva de la Planta de Tratamiento de Tutupali Chico. Sin embargo, la ecuación 31, aplica únicamente para un sistema cerrado. Por ello, previo a la medición del V_{tanque} se cerro completamente las válvulas que regulan el ingreso de agua al tanque de reserva. La ecuación 32, se aplicó para determinar la velocidad del agua a través de la tubería.

$$V_{tubería} = \frac{A_{tanque} * V_{tanque}}{A_{tubería}} \quad (\text{Ecuación 32})$$

3.5 Optimización del proceso de cloración a punto de quiebre

3.5.1 Determinación de la demanda de cloro

Según CONAGUA (2008), la dosis óptima de cloro en una PTAP se puede determinar a partir de ensayos a nivel de laboratorio, en donde, se agregue distintas cantidades de cloro, y posteriormente se realice lecturas de la concentración de cloro libre a través del tiempo. Para finalmente a partir de ello, definir la dosis óptima de cloro total. Además, de esta manera, se puede determinar la dosis adecuada en la cual el cloro residual se encuentre dentro de los rangos recomendados, es decir, entre 0.5 a 1.2 mg/l.

Por tal motivo, como metodología empleada para determinar la dosis óptima de cloro, en el presente estudio, se empleó la denominada cloración a punto de quiebre o punto de ruptura. Para ello, se elaboró el siguiente procedimiento basado en distintas metodologías empleadas por Melgar et al. (2021), Paredes (2023) y Reyes (2017) en donde:

- Como primer paso, se empezó con la toma de muestra de agua proveniente del proceso de filtración. Es decir, a la salida de los filtros de arena. Esto en la PTAP TC. Es importante asegurar que la muestra de agua no entre en contacto con el cloro.
- El volumen total recomendado de la muestra de agua fue de 20 L. Por otra parte, en cuanto a la toma de muestra se siguió la metodología establecida en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2176.
- En el laboratorio, se empezó colocando 1000 ml de muestra de agua en 12 envases de polipropileno (ver Anexo F).
- Posteriormente, se preparó una solución madre de hipoclorito de calcio cuya concentración fue de 1000 ppm. Para ello, previamente fue necesario determinar el peso en gramos de hipoclorito de calcio, esto se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$p = \frac{C \times V}{(\%) \times 10} \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde:

- C: Concentración esperada (1000 mg/L) [mg/L].
 - V: Volumen (1 Litro de Agua ionizada) [L].
 - %: Concentración del hipoclorito de Calcio (65 %).
 - p: Peso del hipoclorito en gramos.
- Por otra parte, se definieron las concentraciones de cloro total para cada una de las muestras, en donde, como concentración inicial el valor fue de 0.5 mg/L, y como concentración final, el valor corresponde a 6 mg/L.

- A partir de las concentraciones definidas en el punto anterior, se determinó los volúmenes de ensayo respectivamente para cada una de ellas. Esto a través de la siguiente ecuación:

$$C_{inicial} * V_{inicial} = C_{final} * V_{final} \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

- $C_{inicial}$: Concentración inicial (1000 mg/L).
 - $V_{inicial}$: Volumen inicial, será el volumen a extraer de la solución madre [ml].
 - C_{final} : Concentración esperada (Concentraciones de cloro total) [mg/L].
 - V_{final} : Volumen de la segunda solución (1000 ml de muestra de agua).
- Una vez determinados los volúmenes de ensayo, mediante el uso de una pipeta se extrae el volumen calculado a partir de la solución madre y se coloca en la muestra de agua correspondiente.
 - Melgar et al. (2021), sugiere que una vez colocado el volumen en la muestra se homogenice por 1 minuto.
 - Es importante registrar la hora en que se coloca el volumen de ensayo, pues, una vez transcurrido los 30 minutos recomendados para que reaccione el cloro en el agua, se empieza a medir el cloro residual, respectivamente para cada muestra.
 - La medición de cloro residual se realizó mediante el uso del equipo HACH modelo DR 890 y los reactivos para medir cloro libre DPD para muestras de 10 ml.
 - Finalmente, a partir de las lecturas de cloro residual, mediante el uso de un software Excel se elaboró la curva de demanda y finalmente se identificó el punto de quiebre o punto de ruptura, mismo que corresponde a la dosis óptima de cloro total.

3.5.2 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos

Se evaluó la calidad de las muestras de agua cruda tomada en la salida de los filtros de la PTAP TC, a través de la medición de algunos parámetros fisicoquímicos como la temperatura, pH, turbiedad, TOC y como también se desarrolló una evaluación microbiológica con el objetivo de identificar la presencia de microorganismos como coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT). A continuación, la tabla 6, presenta los equipos o técnicas empleadas la evaluación de los parámetros antes mencionados.

Tabla 6. Equipos o metodologías utilizadas para la medición de parámetros

Parámetro	Equipo/Método de medición
Temperatura	Sper Scientific Type K/J Thermometer
pH	BOECO pH meter MODEL BT – 600
Turbiedad	HACH 2100P Turbidimeter
Coliformes fecales y totales	Técnica de Fermentación en múltiples tubos
Carbono Orgánico Total (TOC)	Método de Digestión y Oxidación con análisis colorimétrico

4 Capítulo IV: Resultados y Discusión

4.1 Monitoreo de Cloro Residual

Como se mencionó en el apartado 3.2, durante el periodo de monitoreo de cloro residual se realizó un total de 90 lecturas de cloro residual en 15 puntos distribuidos a lo largo de la red (representado en la Figura 13). Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas se representan en la tabla 7. A partir de estos resultados se determinó que el valor mínimo de concentración de cloro residual fue de 0.07 mg/L (Punto 4 - mes de marzo) y el valor máximo de concentración de cloro residual obtenido fue de 1.10 mg/L (Punto 12 - mes de octubre). En cuanto al valor promedio de cloro residual medido el valor correspondió a 0.57 mg/L.

Tabla 7. Concentraciones de cloro residual de la red de distribución en mg/L

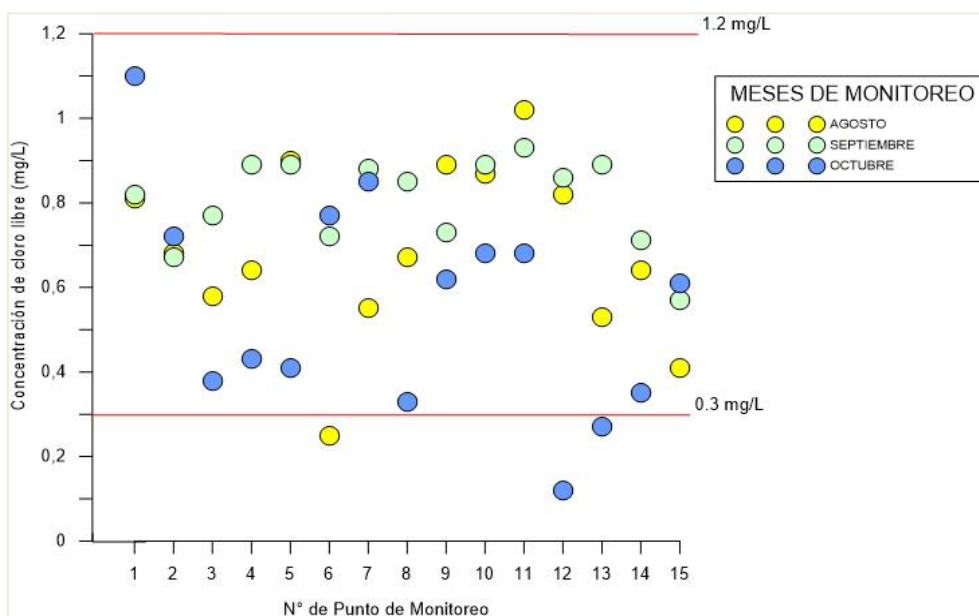
Nº Punto	Agosto	Septiembre	Octubre	Febrero	Marzo	Abril
1	0.81	0.82	1.10	0.84	0.45	0.32
2	0.68	0.67	0.72	0.71	0.09	0.32
3	0.58	0.77	0.38	0.34	0.29	0.18
4	0.64	0.89	0.43	0.25	0.07	0.37
5	0.90	0.89	0.41	0.60	0.49	0.19
6	0.25	0.72	0.77	0.57	0.09	0.25
7	0.55	0.88	0.85	0.56	0.50	0.15
8	0.67	0.85	0.33	0.49	0.59	0.12
9	0.89	0.73	0.62	0.73	0.52	0.60
10	0.87	0.89	0.68	0.81	0.35	0.40
11	1.02	0.93	0.68	0.37	0.48	0.33
12	0.82	0.86	0.12	0.15	0.47	0.39
13	0.53	0.89	0.27	0.54	0.53	0.3
14	0.64	0.71	0.35	0.87	0.43	0.12
15	0.41	0.57	0.61	0.64	0.38	0.28

De la misma manera, la tabla 8 presenta los promedios mensuales de la concentración de cloro residual correspondientes a los 6 meses de monitoreo.

Tabla 8. Valores Promedios Mensuales de las concentraciones de cloro residual

Año	Mes	[mg/L]
2023	Agosto	0.68
	Septiembre	0.80
	Octubre	0.55
2024	Febrero	0.56
	Marzo	0.38
	Abril	0.29

A partir de los resultados de cloro residual obtenidos de los distintos puntos de monitoreo, se evaluó el cumplimiento de los límites establecidos en la norma INEN 1108:2020. La figura 14 presenta las concentraciones de cloro de cada uno de los puntos para la época de verano. En donde, se constató que en ninguno de los puntos se excedió con el límite máximo establecido (0.3 mg/L a 1.2 mg/L). Sin embargo, en los meses de agosto y octubre se evidenció que en los puntos 6, 12 y 13, respectivamente, no se cumplió con la concentración mínima de cloro establecida por la normativa ecuatoriana (0.3 mg/L). No obstante, los puntos 6 y 13, cumplen con el límite de concentración mínima de cloro libre residual (0.2 mg/L) establecido por la OMS y la EPA.

**Figura 14.** Concentraciones de cloro residual de los meses de verano.

Por otra parte, la figura 15 presenta las lecturas de cloro libre residual de cada uno de los puntos de monitoreo correspondiente a la época de invierno. Se evidencia que, para el mes de febrero los puntos 4 y 12 no cumplen con la concentración mínima de cloro residual

establecida en la normativa ecuatoriana. Menos aún, con el límite mínimo establecido por la OMS y la EPA (0.2 mg/L).

En cuanto a los datos reportados en el mes de marzo, el punto 3 no cumple la normativa ecuatoriana, pero si con los límites establecidos por la EPA y la OMS (0.2 mg/L). Mientras que, los puntos 3, 4, 6 no cumplen con ninguna de las concentraciones mínimas establecidas. Finalmente, para el mes de abril, los puntos 5, 6, 15 cumplen únicamente con los límites de concentración de cloro libre mínimo establecido por la OMS y la EPA (0.2 mg/L). Por otro lado, los puntos 3, 7, 8 y 14 no cumplen con ninguno de los límites de concentración mínima establecidos.

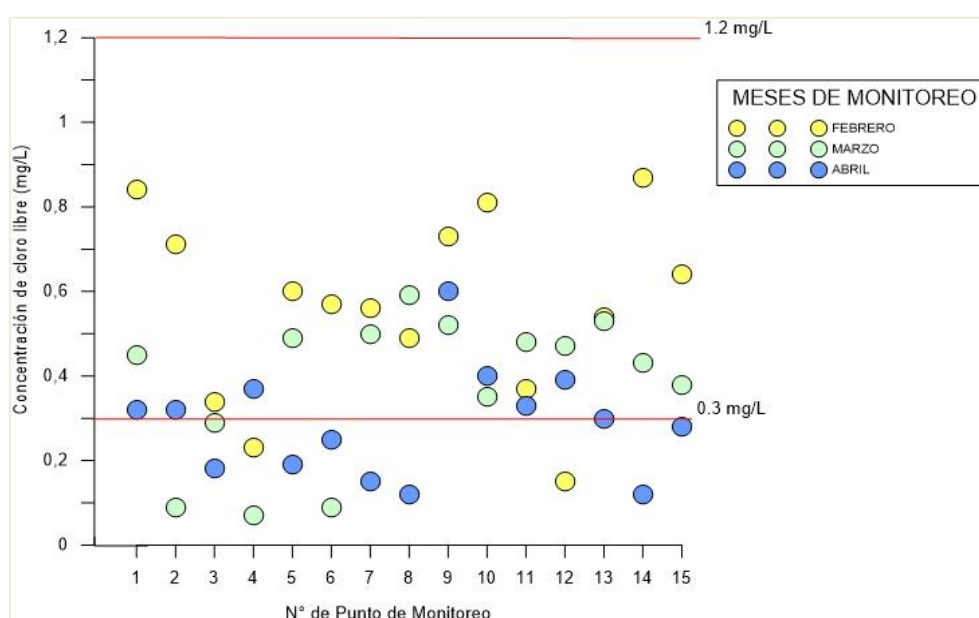


Figura 15. Concentraciones de cloro residual de los meses de invierno.

Turbiedad

La figura 16 presenta las lecturas de turbiedad durante el período de muestreo en verano para los 15 puntos de monitoreo. En agosto (Figura 16a), la turbiedad se mantuvo en 1 NTU en 12 de los puntos, con excepción de los puntos 6, 13 y 15, donde se registraron valores de 2 NTU. En septiembre (Figura 16b), se observó un comportamiento similar, con 13 puntos con una turbiedad de 1 NTU y solo en los puntos 2 y 15 el valor fue de 2 NTU. En octubre (Figura 16c), la turbiedad fue de 1 NTU en 10 puntos de muestreo, mientras que en los puntos 2, 4, 5, 9 y 10 se registró un valor de 2 NTU. Todos estos valores de turbiedad están por debajo del límite de 5 NTU establecido por la normativa ecuatoriana, lo que confirma que la calidad del agua durante los meses de verano analizados fue de buena calidad.

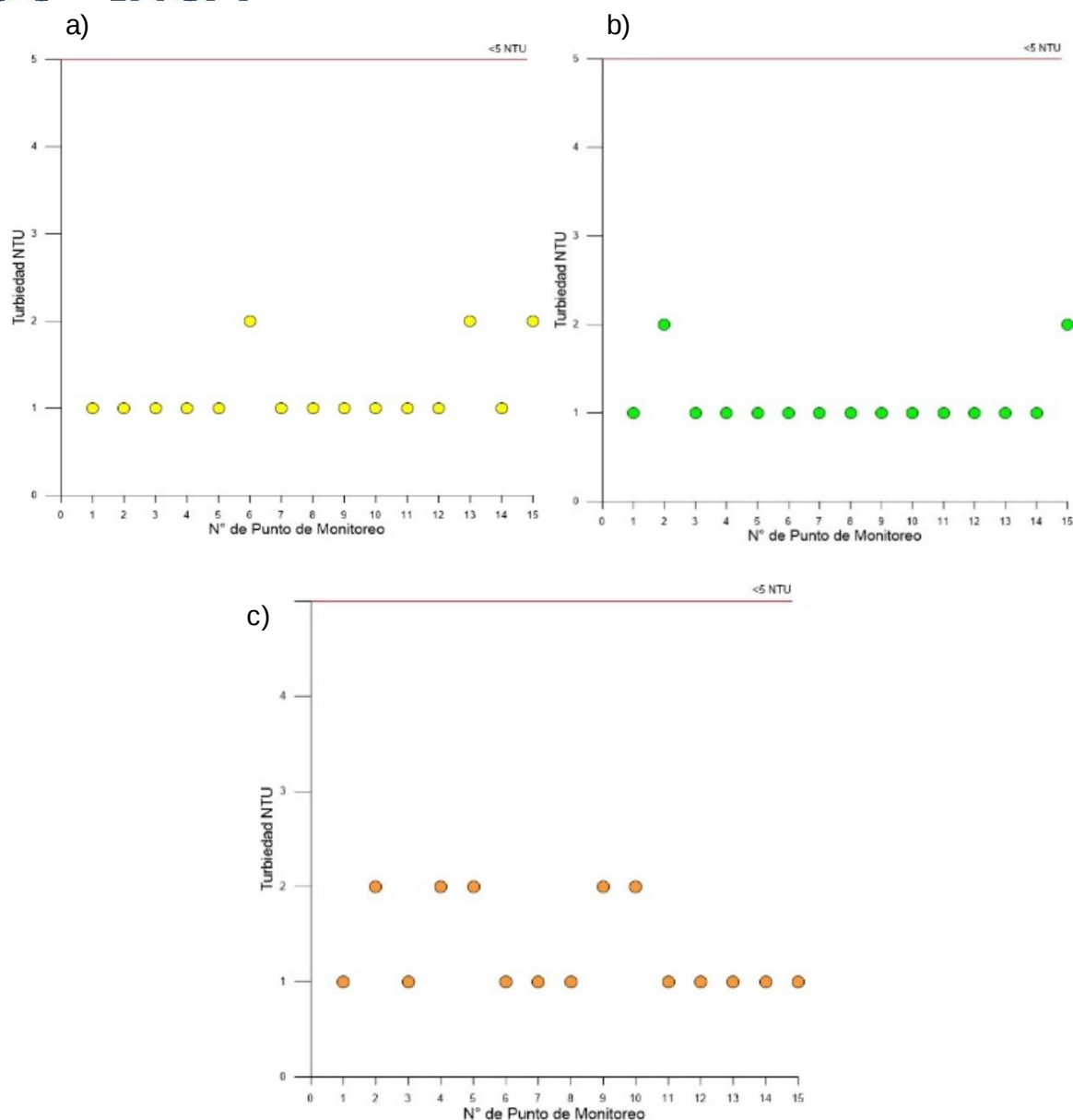


Figura 16. Resultados de las mediciones de turbiedad en los meses de: a) Agosto, b) Septiembre y c) Octubre.

Durante el período de invierno, la turbiedad varió entre 1 y 4 NTU. En febrero (Figura 17a), las lecturas de turbiedad oscilaron entre 1 y 4 NTU. Para el mes de marzo (Figura 17b), los valores de turbiedad registrados fueron iguales en todos los puntos de monitoreo, con un valor de 1 NTU. En abril, sin embargo, se registró un incremento a 3 NTU en los puntos 1, 5, 6, 7, 8, 12 y 14, influenciado principalmente por la presencia de lluvias, especialmente en abril, en el que la precipitación fue significativa. A pesar de estas variaciones, la figura 17 muestra que los valores de turbiedad permanecieron por debajo del límite máximo de 5 NTU establecido por la normativa ecuatoriana, confirmando el cumplimiento de los estándares aceptables para la calidad del agua.

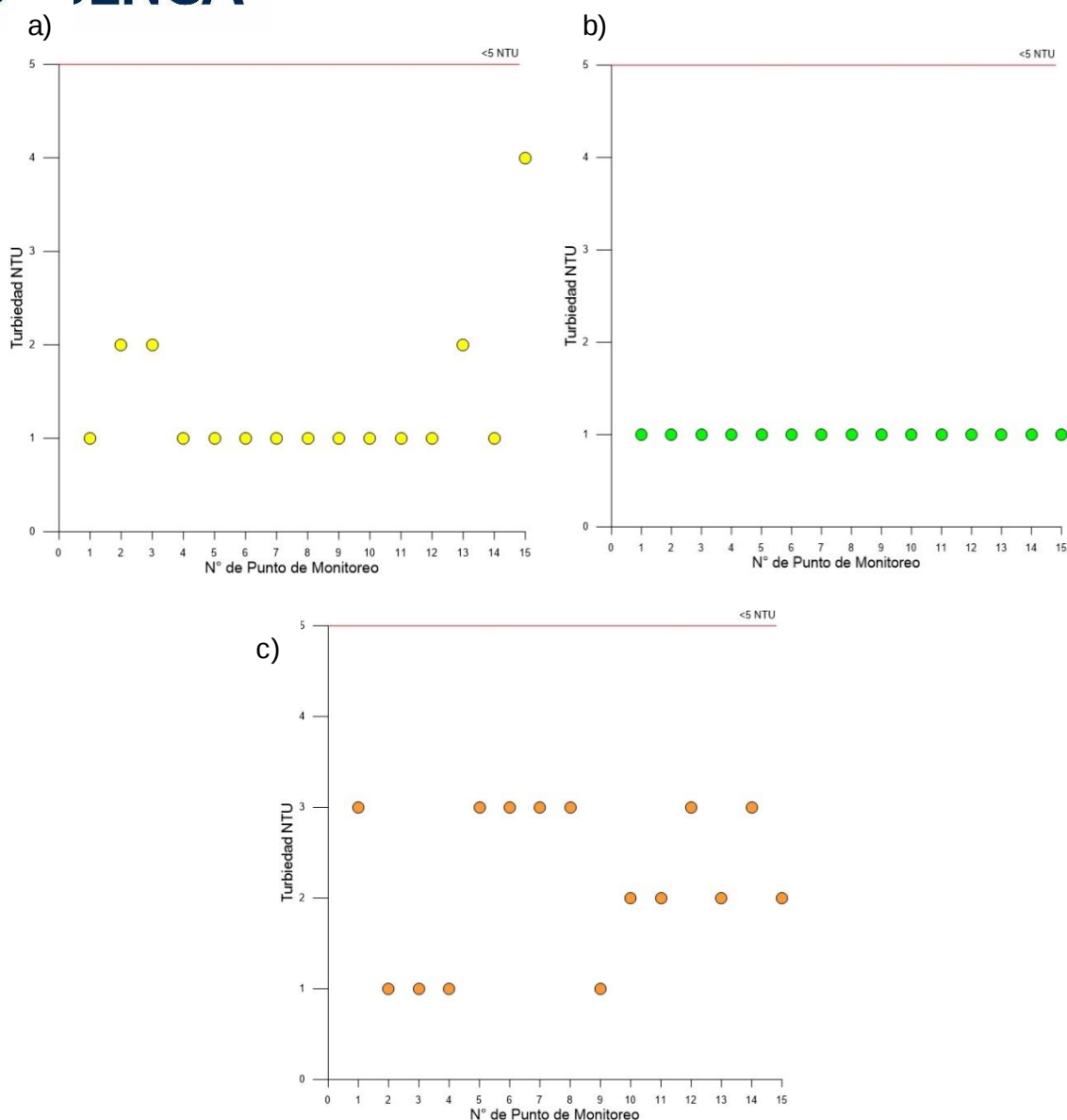


Figura 17. Resultados de las mediciones de turbiedad en los meses: a) Febrero, b) Marzo y c) Abril.

pH

La figura 18 presenta los valores de pH registrados durante la temporada de verano, abarcando los meses de agosto, septiembre y octubre. En agosto, el pH varió entre 6.8 y 7.3. En septiembre, el rango se amplió ligeramente, fluctuando entre 6.5 y 7.4. En octubre, los valores de pH oscilaron entre 6.6 y 7.6. A lo largo de estos tres meses, los valores obtenidos se mantuvieron dentro del rango aceptable según los estándares de calidad de agua establecidos por la OMS, que especifica un intervalo de pH de 6.5 a 8.5.

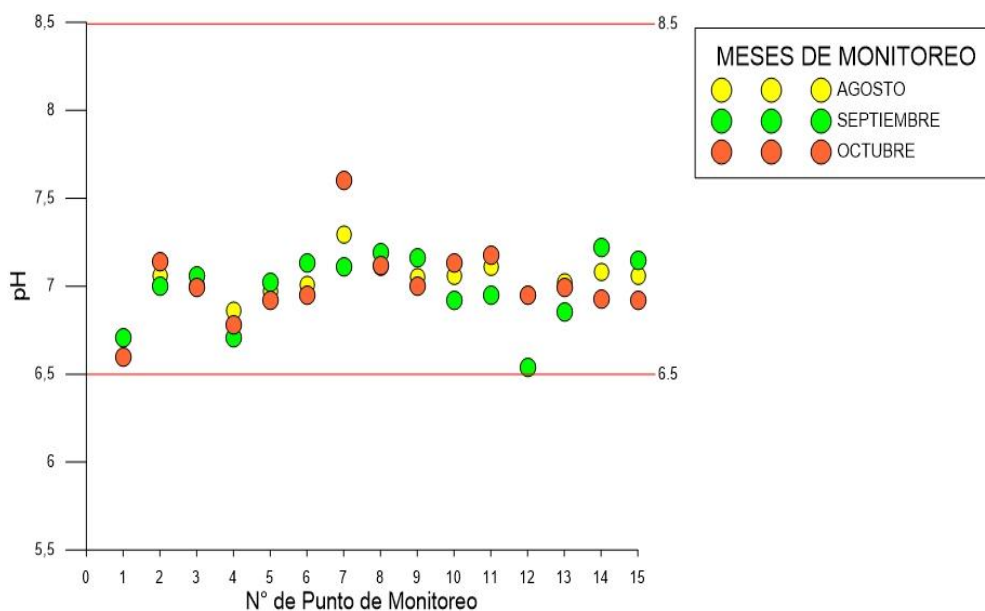


Figura 18. Resultados de las mediciones de pH en los meses de verano.

Durante el periodo de invierno, que incluye los meses de febrero, marzo y abril, los valores de pH oscilaron entre 6 y 7.4, como se observa en la figura 19. En febrero, los puntos de muestreo 1 y 12 registraron valores de pH de 6 y 6.3, respectivamente, por debajo del límite mínimo recomendado por la OMS (6.5). Sin embargo, en marzo y abril, los valores de pH se mantuvieron dentro del rango aceptable según las directrices de la OMS, variando entre 6.5 y 7.4 en todos los puntos de muestreo.

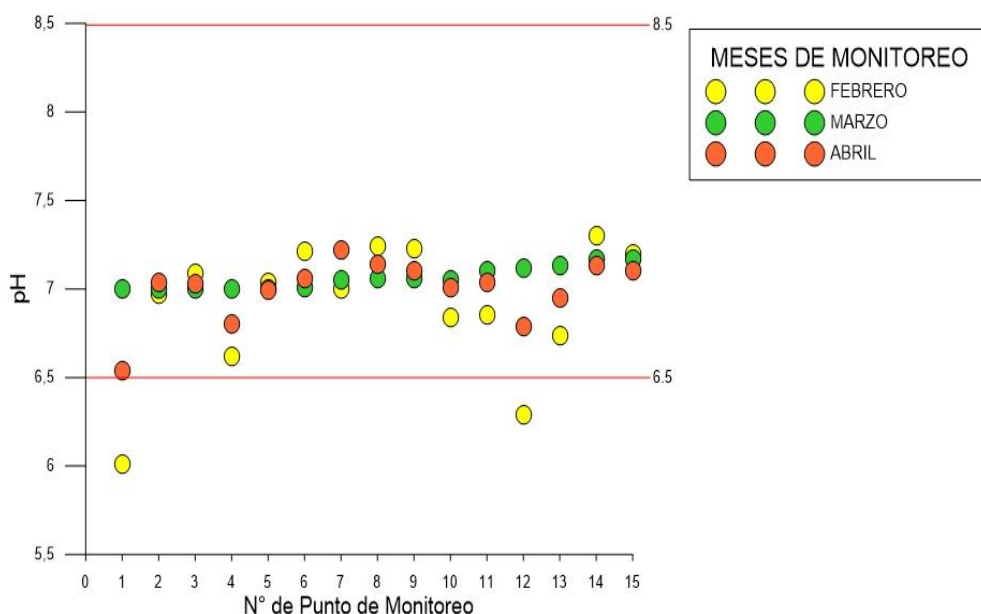


Figura 19. Resultados de las mediciones de pH en los meses de invierno.

A partir de los valores de las variables medidas a lo largo de todo el periodo de monitoreo, se desarrollaron las siguientes relaciones: Concentración de cloro residual – temperatura,

concentración de cloro residual – pH y concentración de cloro residual – turbiedad, con la finalidad de determinar si existe o no una relación entre las variables antes mencionadas. Para ello empleó algunas pruebas descriptivas, cuyos resultados se presentan en el Anexo D.

En principio, se contrastó si las variables siguen una distribución normal, para ello se aplicó una prueba de Anderson-Darling. A partir del cual se obtuvo como resultado que la variable de la temperatura presentó un p-value de 0.0956, y para el caso de la concentración de cloro residual el valor del p-value fue de 0.1653. Por tal motivo, ambas variables siguen una distribución normal, dado que, en ambos casos el p-value es mayor al nivel de significancia (0.05), por ende, no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis de que los datos siguen una distribución normal.

Sin embargo, para las variables de pH y turbiedad los valores de p-value fueron de 3.437×10^{-7} y 2.2×10^{-16} , de manera que en ambos casos se evidencia que el valor p son extremadamente pequeños. Por tal motivo, en este caso existe una evidencia contundente de que las variables no siguen una distribución normal.

Luego de corroborar la normalidad de las variables, se aplicó el test de Correlación de Pearson para la relación entre variables cuya distribución de los datos tenían una tendencia normal en los dos conjuntos de datos y para el caso en el que un conjunto de datos seguía una distribución normal y el otro no, se aplicó un test de correlación de Spearman, dado que, esta prueba de correlación no asume una distribución específica entre las variables.

A partir de lo antes mencionado se obtuvo como resultados que, existe una relación negativa moderada entre la variable de temperatura y la concentración de cloro residual ($r = -0.5480748$), lo que significa que, a medida que la temperatura aumenta, la concentración de cloro residual libre disminuye.

En cuanto al nivel de significancia entre variables, se determinó un p-value de 2.253×10^{-8} , esto afirma que la relación entre variables es altamente significativa. De igual manera, se aplicó la prueba de correlación de Spearman para determinar la relación entre las variables de concentración de cloro residual – turbiedad, en donde, como resultados se obtuvo que existe una relación negativa significativa ($\rho = -0.3834$; p value = 0.002) y entre las variables. Una correlación negativa, expresa que a medida que los valores de turbiedad aumentan la concentración de cloro residual disminuye.

En cuanto a la relación entre la concentración de cloro residual y el pH, al aplicar el test de Spearman, se obtuvo como resultado que el coeficiente de correlación (ρ) presentó un valor

de -0.054 y un valor de p-value de 0.6799. Por lo tanto, a partir del p-value se establece que no existe suficiente evidencia para afirmar la existencia de una correlación entre el pH y la concentración de cloro residual. De igual manera, el coeficiente de correlación de Spearman al presentar un valor muy cercano a cero establece que existe una correlación muy débil. En base a lo antes mencionado, no se puede afirmar que existe una correlación entre las dos variables analizadas.

Adicionalmente, se representó de manera gráfica la relación entre la concentración de cloro residual y las variables de temperatura, pH y turbiedad. Cabe mencionar que, para aquellas variables que siguen una distribución normal, la relación entre las variables se representó de manera gráfica a través de la línea de regresión y para aquellas relaciones en las que una variable siguió una distribución normal y la otra no, la relación entre las variables se presentó de manera gráfica a través de una gráfica de dispersión.

La relación entre la temperatura y la concentración de cloro residual, representado en figura 20, evidencia la relación existente entre estas dos variables. Pues a partir de la línea de regresión, se demuestra que a medida que la temperatura aumenta las concentraciones de cloro residual medidos en los distintos puntos de monitoreo tienden a disminuir. Mientras que, a medida que la temperatura disminuye sucede todo lo contrario.

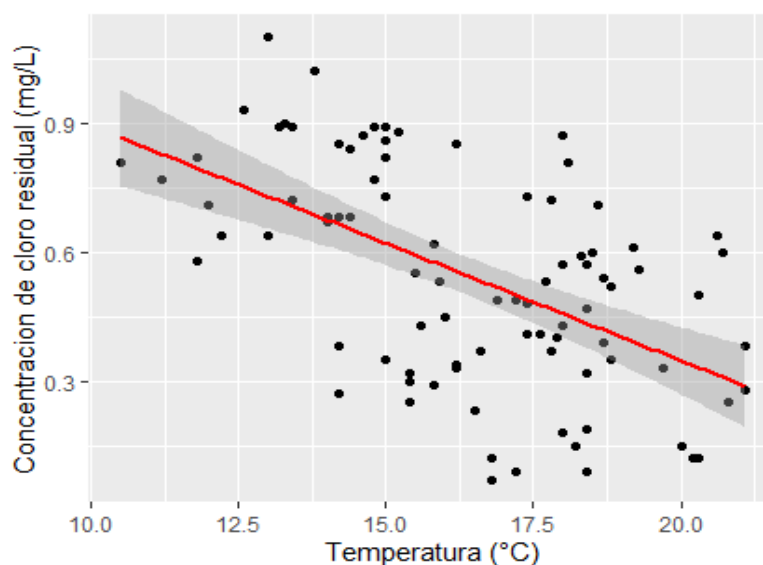


Figura 20. Gráfico de dispersión con línea de regresión de la relación entre el cloro residual y la temperatura.

Por otra parte, la figura 21, muestra de manera gráfica la relación entre la concentración del cloro residual y el pH. A partir de la misma, no se puede definir ninguna relación entre las

variables. Dado que, la línea de tendencia de los valores graficados no sigue ningún patrón definido, reforzando de esta manera los resultados obtenidos al aplicar el test de Spearman.

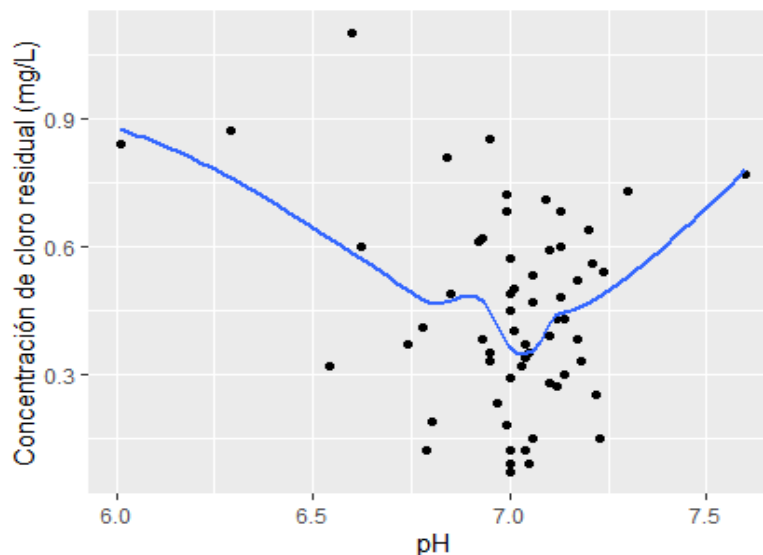


Figura 21. Relación entre la concentración de cloro residual y el pH.

Por último, la figura 22, representa de manera gráfica la relación entre la concentración de cloro residual y los valores de turbiedad. En donde, es evidente que existe una relación negativa entre las variables. De este modo, se puede definir que a medida que la turbiedad aumente la concentración de cloro residual tiende a disminuir.

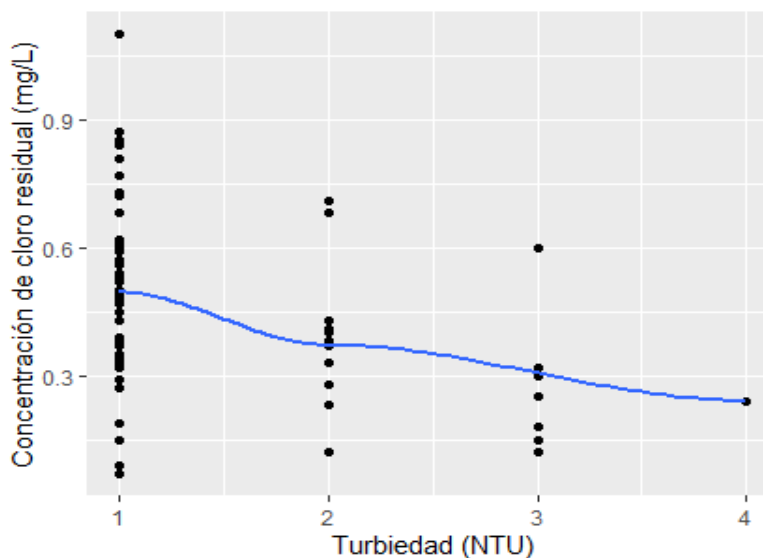


Figura 22. Relación entre la turbiedad y la concentración de cloro residual.

En relación con otros estudios, Gholami (2022) en sus resultados evidencia que, en un rango de temperatura entre 12 °C a 27 °C, a medida que la temperatura ambiente aumenta, el cloro residual disminuye a lo largo de la red de distribución. Por otra parte, Nouri et al. (2015), atribuye a la temperatura como uno de los parámetros responsables de la disminución de la calidad de agua en una red de distribución de agua potable. Dado que, en el desarrollo de su

estudio evidenció que existe diferencia entre datos de cloro residual registrados en la época invernal y la época seca. De manera que a temperaturas altas el cloro residual tiende a disminuir y viceversa. Por otro lado, Viegas et al. (2015) se centra en el impacto que tiene la temperatura sobre la energía de activación del cloro, obteniendo como resultados que la temperatura afecta a las fases de desintegración del cloro rápida y lenta. Sin embargo, Ramirez (2018) indica que, si bien el aumento de la temperatura favorece la acción desinfectante del cloro, también puede propiciar la formación de THMs.

Por otra parte, CONAGUA (2007) y CEAJALISCO (2022), mencionan que el pH está más relacionado con la acción desinfectante del cloro, especialmente la del cloro residual combinado. De manera que, los cambios de pH afectan principalmente a la dosis necesaria para una adecuada desinfección a una misma temperatura y tiempo de contacto.

En cuanto a la turbiedad, Martínez et al. (2020), determinan que es un buen parámetro indicador del proceso de potabilización en una PTAP, dado que sus altos valores reflejan la presencia de polución en el agua cruda a tratar y en el agua potable distribuida a lo largo de las redes de abastecimiento. Por otro lado, Igumbor et al. (2018) y Mohamen et al. (2015), dentro de los hallazgos en sus estudios, determinaron que la eficiencia de la desinfección se ve afectada por los altos niveles de turbiedad, y que esta variable a su vez también limita su eficiencia de eliminación microbiológica.

De esta manera, es evidente que los niveles de turbiedad se relacionan negativamente con el cloro, dado que, altos niveles de turbiedad suponen una mayor demanda de cloro y que en consecuencia la concentración de cloro residual será menor. LeChevallier et al. (1981), pone en evidencia lo antes mencionado, pues, a partir de los resultados de su estudio determinó que la eficiencia de desinfección se correlacionó negativamente con la turbiedad, y que a su vez este factor se vio relacionado con la época del año y otras variables como el carbono orgánico total.

4.2 Determinación del orden de reacción del cloro

Al analizar la concentración de cloro a lo largo de los seis meses de estudio, se utilizaron los datos obtenidos para generar distintas gráficas de linealidad correspondientes a cada orden de reacción. Estos análisis se realizaron en el software Excel, y se obtuvieron ecuaciones lineales con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), lo que permitió la evaluación del modelo que mejor se ajusta a la variabilidad observada en los datos (ver Anexo E).

Con relación a la evaluación de cada modelo de orden de reacción, se presentan los porcentajes de mejor ajuste en la figura 23. Siendo el modelo de orden cero el que presenta un porcentaje promedio de R^2 que varía entre 69.4 % y 90.1 % para los seis meses

analizados. Aunque su representación en algunos casos es buena, la variabilidad entre los meses supone una consistencia moderada. Para el modelo de segundo orden, el porcentaje correspondiente de R^2 oscila entre 61.6 % y 88.6 %. Por lo que, este modelo presenta una mayor dispersión en su capacidad de ajuste, con valores de R^2 relativamente más bajos en comparación con los otros modelos, lo que indica que no puede capturar de forma precisa la variabilidad de los datos en ciertos meses como es el caso de septiembre y febrero. Mientras que, el modelo de primer orden es el que presenta el mejor ajuste general. En todos los meses analizados, el porcentaje de R^2 es consistentemente superior al 80 %, de esta manera indica su alta capacidad y robustez para explicar los datos observados.

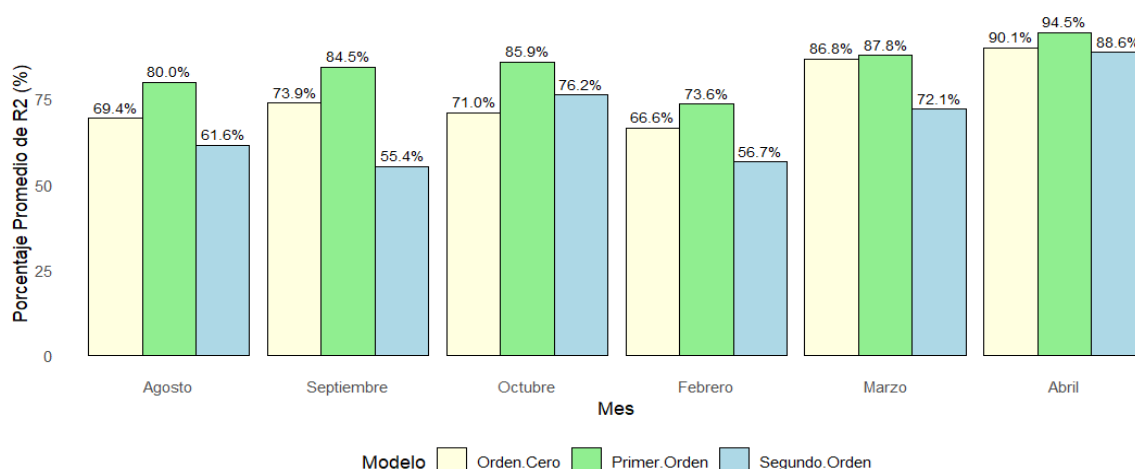


Figura 23. Porcentajes promedio de los valores de R^2 del orden de reacción obtenidos en los seis meses analizados.

Tal como se observa en la figura 24, los datos correspondientes al modelo de reacción de orden cero muestran una moderada linealidad en los seis meses de análisis. En los meses de agosto y octubre la mediana de R^2 se encuentra alrededor de 0.70 y 0.76, respectivamente. Los valores de R^2 presentan una variabilidad significativa, sin la presencia de valores atípicos, lo que indica un ajuste moderadamente lineal para los datos de estos meses. Para el caso de septiembre, la mediana de R^2 es aproximadamente de 0.78. Aunque no se observan valores atípicos, la variabilidad en los valores de R^2 es menor en comparación con los meses anteriores, lo que sugiere una linealidad más consistente. El mes de febrero presenta la mediana de R^2 más baja, con un valor aproximado de 0.64, siendo alta la variabilidad de los datos con la presencia de R^2 más bajos indicando una linealidad más débil en este mes. En lo que respecta a marzo y abril, las medianas de R^2 alcanzan un valor más alto, cercano a 0.88, siendo los valores de R^2 en estos meses los que presentan una menor variabilidad.

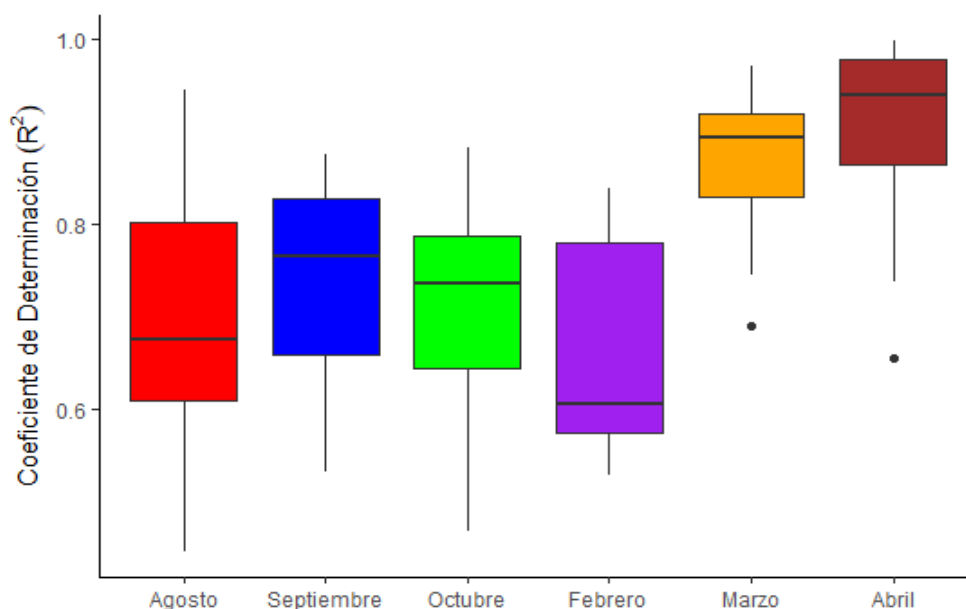


Figura 24. Variación de R^2 de la reacción de orden cero de los seis meses de monitoreo.

Según lo representado en la figura 25, el modelo de primer orden presenta un mejor ajuste en comparación con el modelo de orden cero. Para los meses de agosto y septiembre, la mediana de R^2 se encuentra alrededor de 0.80, lo que representa una menor variabilidad en la dispersión de los datos y una mejor consistencia en el ajuste del modelo en comparación con el modelo anteriormente descrito. El mes de octubre presenta una mediana de R^2 de 0.85, al valor similar al de los meses de marzo y abril que tiene valores de 0.87 y 0.93, respectivamente. Siendo en el mes de febrero en el que se observa la mediana de R^2 más baja de 0.73 debido a una mayor dispersión de los datos y a la presencia de valores atípicos que afectan el ajuste del modelo. Sin embargo, en comparación a los valores obtenidos para el modelo de orden cero, los valores de R^2 para las reacciones de primer orden tienden a ser más altos mostrando un ajuste con mayor precisión y consistencia de los datos.

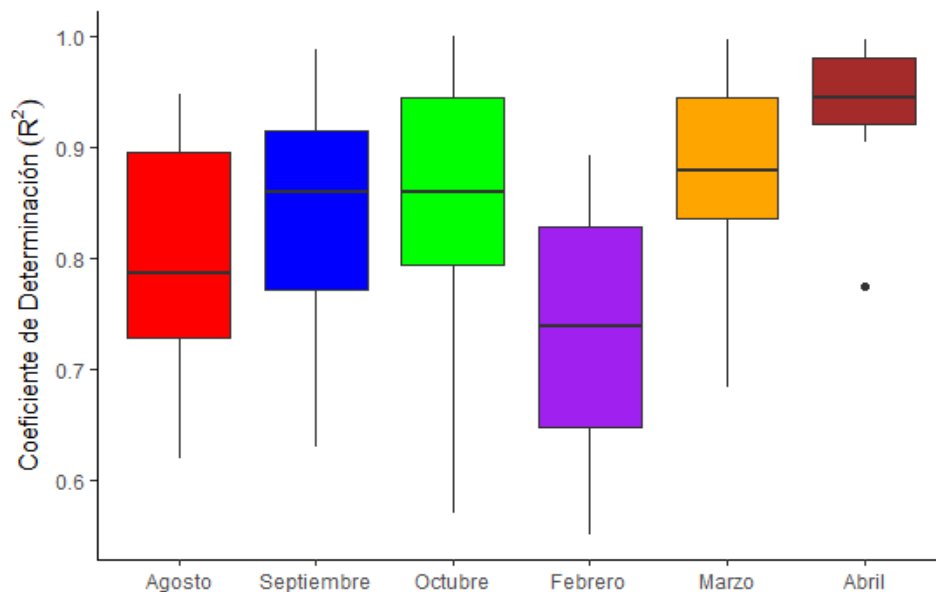


Figura 25. Variación de R^2 de la reacción de primer orden de los seis meses de monitoreo.

Con relación a los valores de R^2 obtenidos en el modelo de segundo orden, la figura 26 representa que existe una mayor variabilidad de los datos en comparación con los dos modelos anteriormente analizados. La mediana de R^2 para los meses de agosto, septiembre y febrero se sitúa en un rango similar, aproximadamente entre 0.56 y 0.58. En contraste, el mes de octubre muestra una mediana de R^2 cercana a 0.79, superando significativamente la mediana de marzo, que se aproxima a 0.64. El mes de abril se destaca como el único mes que tiene una mediana de R^2 más alta, con un valor de 0.89, comparado con los demás meses. No obstante, este modelo presenta una menor precisión y cierta inconsistencia en el ajuste de los datos.

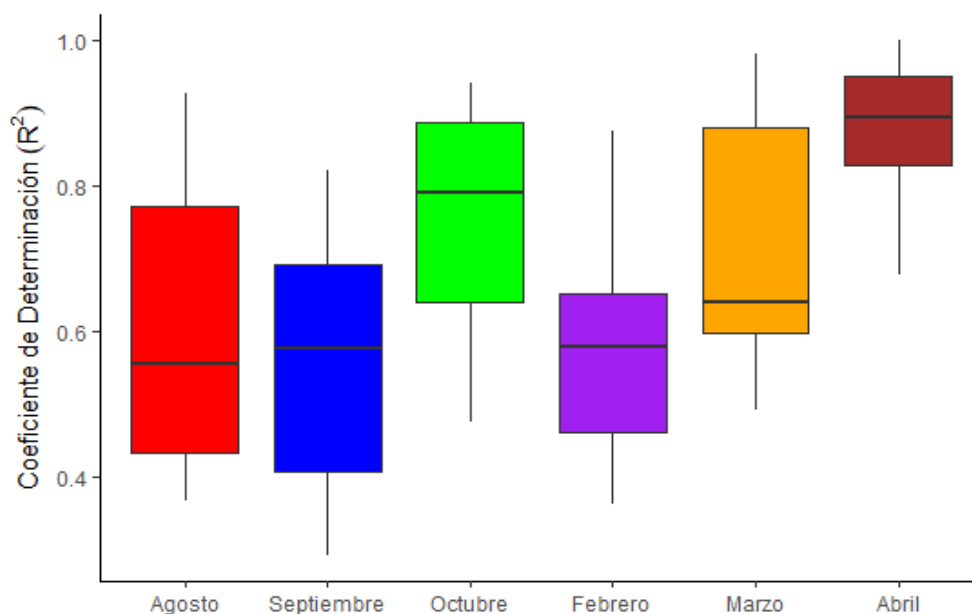


Figura 26. Variación de R^2 de la reacción de segundo orden de los seis meses de monitoreo.

En base a los resultados obtenidos en este estudio, se determina que el orden de reacción del cloro con el agua corresponde a una reacción cinética de primer orden, resultados similares fueron obtenidos en el estudio de García et al. (2020), donde se obtuvo la misma tendencia lineal al graficar los valores del cloro residual en la forma de $\ln(C)$ frente al tiempo de decaimiento. Según Pérez et al. (2022), este modelo es ampliamente utilizado para describir el comportamiento del cloro en redes de distribución de agua potable. Además, el coeficiente de decaimiento que se obtiene de la ecuación procedente de esta reacción de primer orden refleja la influencia de las características específicas del agua y su entorno como lo es la temperatura.

En un estudio a escala piloto de Liao et al. (2022), el coeficiente de determinación (R^2) para una reacción de primer orden fue superior a 0.95, la descomposición del cloro en este caso fue lenta, similar a lo obtenido en el presente estudio en el que el cloro tardó en decaer incluso después de 24 horas, en el 40% de las muestras durante los dos periodos de monitoreo.

Además, el modelo de primer orden obtenido en este estudio demuestra que la velocidad a la que el cloro se descompone es por la relación directa que tiene con su propia concentración. Esto quiere decir que, si la concentración de cloro es alta su tasa de descomposición también será alta. Lo que concuerda con lo descrito por Costa et al. (2023) cuyo estudio recalca que el modelo cinético de primer orden es sencillo y que la concentración de otros reactivos tiene un comportamiento constante por lo que no afectan la velocidad de la reacción de descomposición del cloro.

4.3 Obtención del coeficiente de reacción del cloro con el agua, k_b

Los coeficientes de reacción del cloro con el agua k_b obtenidos en el periodo de monitoreo se presentan en la tabla 9. Estos valores se determinaron a partir de las curvas de decaimiento de cloro correspondientes a cada uno de los puntos de monitoreo y los meses en los cuales se llevaron a cabo las mediciones. Dichas curvas se presentan en el Anexo E.

Cabe mencionar que cada una de las curvas obtenidas fueron ajustadas de manera exponencial, de manera que se obtuvo k_b de acuerdo con lo expresado en la ecuación 25. En lo que respecta al valor máximo y mínimo de dicho coeficiente, se identificaron los valores de 1.560 h^{-1} y 0.055 h^{-1} respectivamente (Tabla 9). De la misma manera, en la tabla 10 se expresan los valores promedio correspondientes al coeficiente de relación del cloro con el agua (k_b). A partir de ello, podemos identificar que el coeficiente promedio de relación del cloro con el agua corresponde al valor de 0.4097 h^{-1} .

Tabla 9. Coeficiente de reacción del cloro con el agua, kb (h^{-1})

N° Punto	Agosto	Septiembre	Octubre	Febrero	Marzo	Abril
1	0.087	0.180	0.072	0.354	0.703	0.710
2	0.382	0.333	0.632	0.080	0.153	0.768
3	0.377	0.408	0.471	0.101	1.134	0.896
4	0.192	0.085	0.088	0.103	0.236	0.864
5	0.466	0.164	0.079	0.378	0.231	0.601
6	0.619	0.581	0.595	0.389	0.406	0.601
7	0.732	0.300	0.178	0.674	0.318	0.661
8	0.069	0.114	0.057	0.056	0.118	0.441
9	0.109	0.151	0.118	0.124	0.459	0.497
10	0.062	0.253	1.560	0.074	0.806	0.604
11	0.071	0.162	1.56	0.082	0.135	1.199
12	0.105	0.161	0.534	0.558	0.228	0.810
13	0.073	0.056	0.339	0.091	0.204	1.151
14	0.065	0.055	0.881	0.095	0.137	0.693
15	0.413	0.171	0.393	0.09	0.875	1.117

Tabla 10. Valores promedios mensuales correspondientes a kb

Año	Mes	kb (h^{-1})	kb (d^{-1})
2023	Agosto	0.255	6.112
	Septiembre	0.212	5.078
	Octubre	0.571	13.693
2024	Febrero	0.217	5.199
	Marzo	0.408	9.786
	Abril	0.774	18.579
Promedio		0.406	9.741

Por otra parte, la figura 27 presenta el comportamiento del coeficiente de reacción del cloro con el agua (kb) de cada uno de los meses de monitoreo. En donde se evidencia que, el mes de octubre presenta una mayor variabilidad en los valores de la constante kb, además es el

mes en el cual, se presenta el valor máximo de kb. Mientras que, el mes de septiembre presenta la menor variabilidad en los valores de kb de todos los meses de monitoreo; además, en este mes se identificó el valor mínimo de kb de todos los meses de monitoreo (0.055 h^{-1}). En cuanto a las medianas presentadas por la línea central de cada una de las cajas, se evidencia que no existe ningún patrón o relación entre los meses de monitoreo.

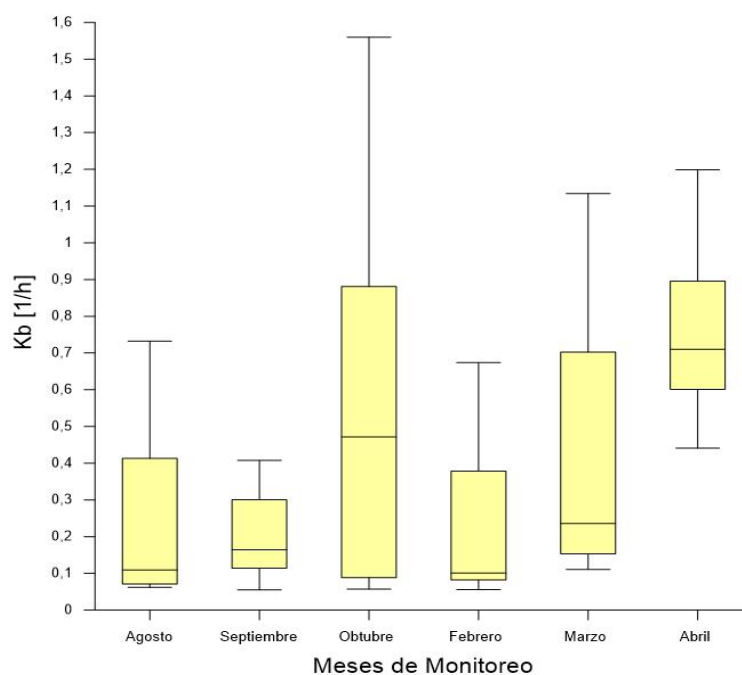


Figura 27. Comportamiento del coeficiente kb en los meses de monitoreo.

En tanto, el comportamiento del coeficiente kb por épocas de monitoreo se presenta en la figura 28, se aprecia que en la época de verano la mediana del coeficiente kb es menor a la época de invierno lo que acredita que la constante kb determinada cumple con lo establecido en la literatura.

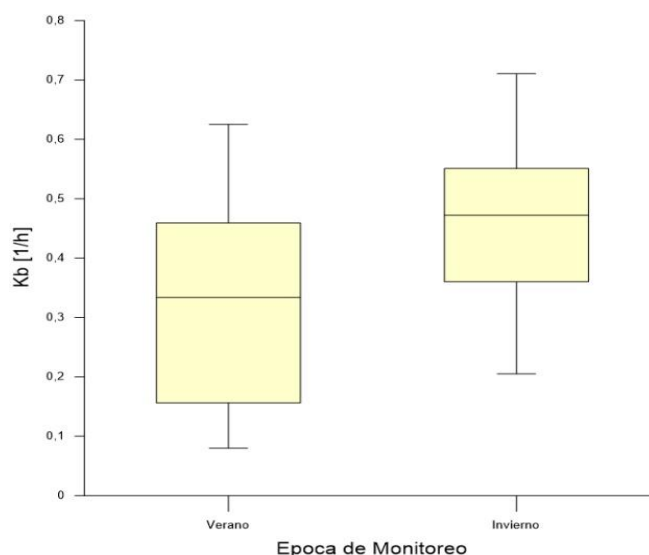


Figura 28. Comportamiento del coeficiente kb en las épocas de monitoreo.

Según los valores del coeficiente de reacción del cloro con el agua (k_b) su intervalo varió entre 0.00550 h^{-1} a 1.56 h^{-1} durante los seis meses de monitoreo. Este proceso fue similar a lo realizado por Alcocer et al. (2004) quienes recogieron 64 muestras de agua de una red de distribución y las almacenaron en recipientes limpios y posteriormente midieron la concentración de cloro residual cada hora hasta obtener su decaimiento que fue al darse un valor de 0.03 mg/L como en nuestro caso de estudio en el que en un 95 % de los puntos monitoreados se terminó su medición al decaer el cloro hasta valores entre 0.04 mg/L y 0.03 mg/L . Sin embargo, el intervalo de k_b obtenido fue de 0.0519 h^{-1} hasta 0.6931 h^{-1} , siendo valores inferiores en comparación a los valores obtenidos en este estudio. Sánchez et al. (2010) sugiere que esta variación de los valores de k_b puede deberse a la intervención de factores como lo es la temperatura, la cantidad de Carbono Orgánico Total, la turbiedad y sobre todo la concentración de cloro al inicio de la medición. Siendo por esta razón que el valor de k_b es considerado como propio de cada red de distribución según las características que presenta el agua.

El valor obtenido de k_b correspondiente a 0.406 h^{-1} es superior a lo reportado por estudios como el caso de Castro & Neves (2003) que obtuvieron un valor de 0.0143 h^{-1} , y lo reportado por Shahrukh & Hassan (2005) en cuyo estudio se obtuvo un k_b de 0.034 h^{-1} . Como se puede observar en la tabla 10, los valores promedio para cada periodo de medición varían significativamente debido a la influencia de la temperatura. Durante los meses de invierno, se registraron niveles de temperatura más elevados, oscilando entre $17.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $18.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. En contraste, en los meses de verano, las temperaturas fueron más bajas, fluctuando entre 14.1°C y 15.6°C . Esta variación estacional tiene un impacto directo en el coeficiente de reacción del cloro con el agua (k_b). Según García et al. (2020), a medida que aumenta la temperatura, también se incrementa el k_b . Esta relación es evidente en los datos obtenidos. Por ejemplo, en el mes de agosto, con una temperatura promedio de $14.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, se obtuvo un k_b de 0.255 h^{-1} . En cambio, en abril, cuando la temperatura promedio fue de $18.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, el k_b se incrementó a 0.774 h^{-1} .

Por otra parte, a partir de los resultados de k_b obtenidos, se evidencia que los valores que exceden a la media de k_b , es decir son superiores a 0.406 h^{-1} , en gran parte se encuentran en los puntos definidos en los extremos de la red de distribución. Por tal motivo, se realizó una medición de TOC, de manera que, se identifique si esta variable influye o no en los resultados de k_b determinados. En donde como resultados (Tabla 11) se obtuvo que en los puntos 11, 13, 15 se registraron mediciones de TOC de 12.8 , 13.5 y 14.1 mg/L respectivamente. Cabe mencionar que, estos 3 puntos son los que se encuentran más alejado a la PTAP TC. En cuanto a los puntos 3, y 6, cuya distancia es similar a la PTAP TC, los valores

de TOC correspondieron a 4.7 y 4.4 mg/L respectivamente. Finalmente, los puntos 8 y 9 presentaron concentraciones iguales de TOC de 5.4 mg/L. De esta manera es evidente que, las dos variables tienden a incrementar juntas. Además de que a medida que, el punto de monitoreo se aleja con respecto a la PTAP TC, los valores de TOC tienden a aumentarse. Dando a presumir que existe polución a lo largo de la red de distribución y por ende una acumulación de MON u otros compuestos orgánicos en los puntos más alejados de la red.

Tabla 11. Resultados de TOC en los puntos extremos de la red

N° Punto	Nombre del punto	Kb (h ⁻¹)	Concentración de TOC (mg/L)
3	Barrio Cruz Loma	0.76	4.7
6	Barrio Era	0.61	4.4
8	Canchas Gool Garden	0.44	5.4
9	Hacienda Sigüenza	0.50	5.4
11	Capulispamba	1.99	12.8
13	Escuela Francisco Moscoso	1.51	13.5
15	Quinta Guillermina	1.12	14.1

Además de la temperatura, la presencia de la materia orgánica natural (MON) también contribuye significativamente en la demanda de cloro. Según Mazhar et al. (2020), las fuentes de agua potable contienen MON, especialmente en forma de ácidos húmicos y fúlvicos. Estos compuestos reaccionan con el cloro, generando una variedad de subproductos, como los trihalometanos, lo que incrementa la demanda de cloro y consecuentemente, en el alto valor obtenido de kb.

4.4 Obtención del coeficiente global de decaimiento del cloro, K

De acuerdo con lo descrito en la sección 3.4.3 se determinó la velocidad del flujo de agua realizando en primera instancia dos ensayos de la medida del caudal a la salida del tanque de reserva de la PTAP, tal como se observa en la figura 29. El intervalo de tiempo de medición para ambos ensayos fue en promedio de aproximadamente 1 hora. El tramo de tubería analizado corresponde a la tubería de suministro que está conectada al tanque de reserva, siendo su longitud de 149.79 m según lo medido en el catastro de la red, los datos obtenidos se visualizan en la tabla 12.

Tabla 12. Características de la tubería

Material de fabricación	Longitud del tramo	Diámetro de la tubería [pulgadas]	Área de la sección de tubería [m ²]
Tipo PVC	149.79	4"	0.0081

En el primer ensayo, se registró un caudal promedio de salida del tanque de 0.005 m³/s (Tabla 13). Durante este ensayo, la capacidad volumétrica del tanque fue de 99.20 m³, y la altura del nivel del agua desde la cual se inició la medición fue de 2.30 m.

**Figura 29.** Medición del caudal utilizando el método volumétrico.**Tabla 13.** Resultados del ensayo 1 de la obtención del caudal de salida del tanque de reserva de la PTAP

Medición del caudal					
Hora inicial	10:46	Altura inicial (m)	2.30	Volumen inicial (m ³)	99.20
Hora	Altura (m)	Diferencia de tiempo (s)	Volumen (m ³)	Diferencia de volumen (m ³)	Caudal (m ³ /s)
11:00	2.2	840	94.9	4.312	0.005
11:15	2.1	900	90.6	4.312	0.006
11:28	2.0	780	86.2	4.312	0.005
11:43	1.9	900	81.9	4.312	0.005
11:57	1.8	840	77.6	4.312	0.005
12:11	1.7	840	73.3	4.312	0.005
12:26	1.6	900	69	4.312	0.005
Promedio					0.005

En el segundo ensayo, al momento de medir el caudal de salida, el tanque de reserva tenía una capacidad volumétrica de 94.90 m^3 . Se inició la medición con un nivel de agua de 2.20 m de altura del tanque de reserva y se observó la disminución del volumen de agua durante un intervalo de aproximadamente 1 hora, resultando en un caudal de salida promedio de $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$, como se detalla en la Tabla 14.

Este resultado valida que el caudal de salida obtenido en el primer ensayo, donde también se obtuvo un caudal promedio de $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$, concuerda con el del segundo ensayo. Por lo tanto, el método volumétrico se determina como una opción viable cuando no se dispone de un equipo directo para medir el caudal de salida de un tanque de reserva de agua.

En cuanto al cálculo de la velocidad del flujo que atraviesa el tramo de la tubería analizada, con el caudal de salida del tanque de reserva de $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtuvo un valor de 0.62 m/s para el primer ensayo y 0.65 m/s para el segundo ensayo. Estos valores concuerdan con las recomendaciones de la AWWA (2006), que establece que la velocidad del agua en las tuberías de una red de suministro de agua debe estar en un rango de 1 a 3 m/s, considerando una velocidad mínima de 0.6 m/s para evitar problemas de sedimentación en la tubería.

Tabla 14. Resultados del ensayo 2 de la obtención del caudal de salida del tanque de reserva de la PTAP.

Medición del caudal					
Hora inicial	10:30	Altura inicial (m)	2.20	Volumen inicial (m^3)	94.90
Hora	Altura (m)	Diferencia de tiempo (s)	Volumen (m^3)	Diferencia de volumen (m^3)	Caudal (m^3/s)
10:42	2.1	720	90.6	4.312	0.006
10:58	2	960	86.2	4.312	0.004
11:11	1.9	780	81.9	4.312	0.006
11:25	1.8	840	77.6	4.312	0.005
11:29	1.77	240	76.3	1.294	0.005
11:39	1.7	600	73.3	3.018	0.005
Promedio					0.005

Según lo descrito en el apartado 3.4.3, se midió la concentración del cloro residual en el tanque de reserva de la PTAP, teniendo en cuenta que es el inicio del tramo de la tubería analizada. En este punto, se registró un valor de 0.89 mg/L . Posteriormente, a una distancia de 149.79 m desde este punto inicial, se midió la concentración final del cloro residual,

obteniéndose un valor de 0.86 mg/L. Es importante destacar que, debido a la profundidad de la tubería, se midió el cloro residual en la llave de agua de una casa ubicada en esta distancia.

En cuanto a la velocidad del flujo que pasa a través del tramo de la tubería que está conectada al tanque de reserva, se registró un valor promedio de 0.62 m/s para el ensayo 1. Al aplicar la ecuación 30, se determinó que el coeficiente global de decaimiento (K) fue de 0.51 h⁻¹, como se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15. Datos obtenidos en el ensayo 1 con respecto a las variables K

Variable	Unidades	Valor Correspondiente
Concentración Inicial (Co)	mg/L	0.89
Concentración Final (C)	mg/L	0.86
Velocidad (v)	m/s	0.62
Longitud del tramo (L)	M	149.79
Coeficiente global (K)	h ⁻¹	0.51

En el segundo ensayo se tuvo una concentración inicial de cloro residual de 0.69 mg/L del agua contenida en el tanque de reserva de la PTAP. Al final del tramo, ubicado a una distancia de 149.79 m desde el punto inicial, se registró una concentración de 0.67 mg/L, tal como se detalla en la tabla 16. Además, la velocidad de flujo en este caso fue de 0.65 m/s. Al aplicar estos valores en la ecuación 30, se calculó un coeficiente global de decaimiento de 0.46 h⁻¹.

Tabla 16. Datos obtenidos en el ensayo 2 con respecto a las variables de K

Variable	Unidades	Valor Correspondiente
Concentración Inicial (Co)	mg/L	0.69
Concentración Final (C)	mg/L	0.67
Velocidad (v)	m/s	0.65
Longitud del tramo (L)	M	149.79
Coeficiente global (K)	h ⁻¹	0.46

El coeficiente global de decaimiento del cloro (K) promedio obtenido en nuestro estudio fue de 0.49 h⁻¹, un valor mayor en comparación con los valores reportados por Alcocer & Tzatchkov (2004), que oscilaron entre 0.2478 h⁻¹ y 0.189 h⁻¹. Esta discrepancia puede explicarse debido a las diferencias en las características físicas y operacionales de las tuberías evaluadas en ambos estudios. En el estudio de Alcocer & Tzatchkov (2004), las

tuberías tenían diámetros que variaban entre 10 y 16 pulgadas, longitudes que oscilaban entre 1000 y 3000 metros, y velocidades de flujo entre 0.9276 m/s y 1.5341 m/s. En contraste, en el presente trabajo, la tubería analizada tiene una longitud aproximadamente de 149 metros, un diámetro de 4 pulgadas, y una velocidad de flujo de 0.64 m/s.

Estas diferencias son cruciales, debido a que, Garcia Avila (2019) determinó que la velocidad de flujo es un factor determinante en el coeficiente global de decaimiento del cloro. En su estudio, que analizó seis tuberías de distintos diámetros y longitudes con velocidades de flujo que oscilaban entre 0.11 m/s y 1.43 m/s, se concluyó mediante un análisis de regresión lineal múltiple que la velocidad de flujo tiene una influencia significativa en el valor de K. Por lo tanto, la velocidad de flujo en la tubería analizada en este estudio es la velocidad mínima a la que circula el agua a través de una tubería, lo que podría explicar la obtención de un coeficiente global de decaimiento mayor, en comparación con Garcia Avila (2019) que obtuvo un valor de K entre 0.16 h^{-1} y 0.23 h^{-1} . Sin embargo, una limitación importante de nuestro estudio fue que, no fue posible desarrollar ensayos adicionales en las tuberías de la red que presentaban distintos diámetros debido a la dificultad de acceso a estas tuberías.

La contribución principal al coeficiente global de decaimiento de cloro (K) en nuestro estudio, se debe principalmente al coeficiente de reacción del cloro con el agua (k_b) de 0.406 h^{-1} . Como se explicó en el apartado 4.2, la temperatura es un factor importante que influye en el incremento del valor de k_b . Los valores altos de temperatura del agua incrementan las reacciones químicas entre el cloro y los compuestos presentes, lo que aumenta la tasa de decaimiento del cloro.

4.5 Cálculo de la constante de interacción del cloro con la pared de la tubería, k_w

En relación con la determinación de la constante de interacción del cloro con la pared (k_w), y según lo descrito en el apartado 3.4.2, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 17. Para el primer ensayo, la diferencia entre los valores de K y k_b dio como resultado un valor de k_w de 0.11 h^{-1} . De igual forma, con los datos obtenidos en el segundo ensayo proporcionaron un valor de k_w de 0.05 h^{-1} . Siendo el promedio de k_w para ambos ensayos correspondiente al valor de 0.079 h^{-1} .

Tabla 17. Datos obtenidos de kw de acuerdo con los dos ensayos realizados

Resultados Ensayo 1		
kb (h ⁻¹)	K (h ⁻¹)	kw (h ⁻¹)
0.406	0.51	0.11
Resultados Ensayo 2		
kb (h ⁻¹)	K (h ⁻¹)	kw (h ⁻¹)
0.406	0.46	0.05
Promedio		0.079

En base al resultado obtenido, se determinó que la constante de reacción del cloro con la tubería corresponde a un valor de 0.079 h⁻¹ (1.896 d⁻¹). Que en comparación con los resultados reportados en otros estudios el valor de la constante de reacción del cloro con el agua obtenido presenta un valor próximo al de otras investigaciones como: Patil & Jariwala, (2017), que desarrollaron un estudio para determinar el kw para la ciudad de Dhule (India), trabajando con un total de 5 zonas distribuidas a lo largo de la misma, y que al final se reportó un valor de Kw de 0.55/día (0.023/h). Por otra parte, autores como: Alcocer et al. (2004), y Vuta & Dumitran, (2011) reportan un valor de 2.37/día (0.98/h) y 4.08/día (0.17/h) respectivamente.

Del mismo modo, Costa et al. (2023) reportan un coeficiente kw que corresponde a un valor de 4.08/día (0.17/h), el cual lo relaciona con el crecimiento de biofilms y los materiales de las tuberías de la red de distribución. Al igual que, Nono et al. (2019), quienes en el desarrollo de su investigación evaluaron el coeficiente de reacción del cloro con la pared de las tuberías (kw) mediante ensayos desarrollados en un periodo de 4 semanas reportando los siguientes valores de kw: 0.74, 0.76, 1.6 y 1.29 /h respectivamente. De igual manera, los resultados reportados lo relacionan con factores como el estado de las tuberías, el crecimiento de biopelículas y el material de la tubería, atribuyendo que estos factores son los que más afectan en la tasa de descomposición del cloro en comparación con las reacciones mismas del cloro con el agua.

4.6 Dosificación óptima del cloro

4.6.1 Determinación de la dosis óptima de cloro para la PTAP de Tutupali Chico

La determinación de la dosis óptima de cloro se realizó mediante la cloración a punto de quiebre, cabe mencionar que, la dosis óptima fue determinada para el uso del hipoclorito de calcio, en las situaciones en las cuales, la PTAP de Tutupali Chico no cuente con el

abastecimiento del cloro gaseoso o se presenten problemas en los equipos de dosificación. Además, esta prueba se llevó a cabo en un entorno de laboratorio y se realizó tres ensayos con el fin de aumentar la confianza en los resultados de la dosis óptima.

A continuación, se detallan los datos determinados en las pruebas de laboratorio para cada uno de los ensayos, además de los valores correspondiente a las variables medidas en las muestras de agua y las dosis óptimas de cloro total identificadas. Cabe mencionar que, la concentración de cloro combinado se obtuvo mediante la ecuación 28. La tabla 18 presenta los resultados del primer ensayo, a partir del cual se visualiza que, desde el envase 3 hasta el envase 9 las concentraciones de cloro residual se encuentran dentro del valor mínimo (0.3 mg/L) y máximo (1.5 mg/L) establecido en la normativa ecuatoriana. Mientras que las concentraciones de los envases 1, 2 no cumplen con el límite mínimo de concentración de cloro residual y por otra parte el envase 10, excede el límite máximo establecido.

Tabla 18. Resultados obtenidos del ensayo 1 para la demanda de cloro

N° Envase	Cloro Total (mg/L)	Volumen (ml)	Cloro Residual (mg/L)	Cloro Combinado (mg/L)
1	0.5	0.5	0.10	0.40
2	1.0	1.0	0.10	0.90
3	1.5	1.5	0.36	1.14
4	2.0	2.0	0.54	1.46
5	2.5	2.5	0.65	1.85
6	3.0	3.0	0.67	2.33
7	3.5	3.5	1.16	2.34
8	4.0	4.0	1.24	2.76
9	4.5	4.5	1.28	3.22
10	5.0	5.0	1.37	3.63
11	5.5	5.5	1.47	4.03
12	6.0	6.0	1.66	4.34

Según los resultados obtenidos en el primer ensayo, se determinó que la dosis optima de cloro que debe aplicarse en la PTAP TC corresponde a un valor de 2.86 mg/L, lo cual permite obtener una concentración de cloro residual de 0.63 mg/L. Este resultado se determinó de manera empírica a partir de la figura 30, y tomando como referencia la figura 8.

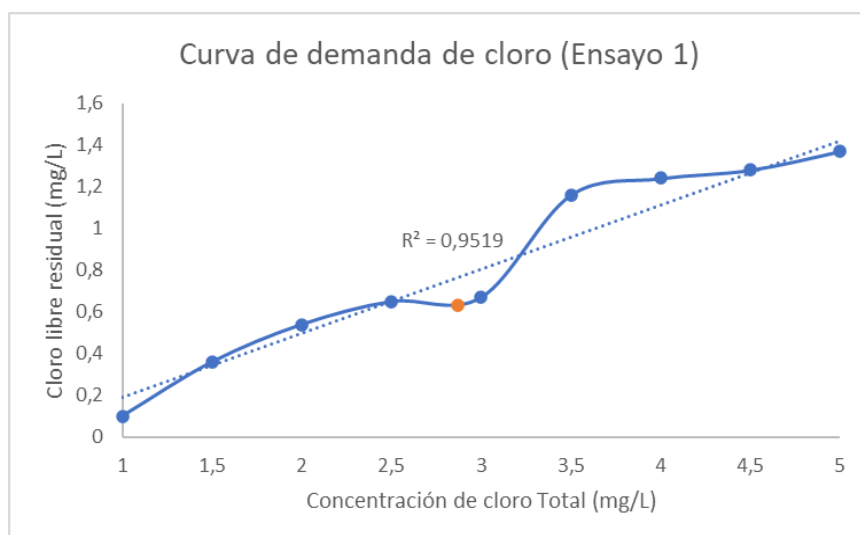


Figura 30. Curva de Demanda de Cloro de la PTAP TC (Ensayo 1).

De igual manera, la Tabla 19 presenta los resultados obtenidos en el segundo ensayo, en donde la concentración de cloro residual desde el envase 3 hasta el envase 9, cumplieron con los valores mínimos y máximos establecidos en la normativa. Por otra parte, los envases 1 y 2, no cumplen con el nivel mínimo de concentración de cloro residual, mientras que, a partir del envase 10 se exceden el límite de la concentración máxima de cloro residual establecido en la normativa ecuatoriana.

Tabla 19. Resultados obtenidos del ensayo 2 para la demanda de cloro

Nº envase	Cloro Total (mg/L)	Volumen (ml)	Cloro Residual (mg/L)	Cloro Combinado (mg/L)
1	0.5	0.5	0.20	0.30
2	1.0	1.0	0.20	0.80
3	1.5	1.5	0.43	1.07
4	2.0	2.0	0.63	1.37
5	2.5	2.5	0.88	1.62
6	3.0	3.0	0.92	2.08
7	3.5	3.5	1.17	2.33
8	4.0	4.0	1.27	2.73
9	4.5	4.5	1.39	3.11
10	5.0	5.0	1.53	3.47
11	5.5	5.5	1.81	3.69
12	6.0	6.0	1.56	4.44

La dosis óptima de cloro correspondiente al segundo ensayo se determinó de la misma manera que del ensayo 1. Es decir, a partir de la figura 31, se determinó la dosis óptima misma que corresponde a una concentración de 2.97 mg/L de cloro total. Dosis en la cual, se obtiene como concentración de cloro residual un valor de 0.92 mg/L.

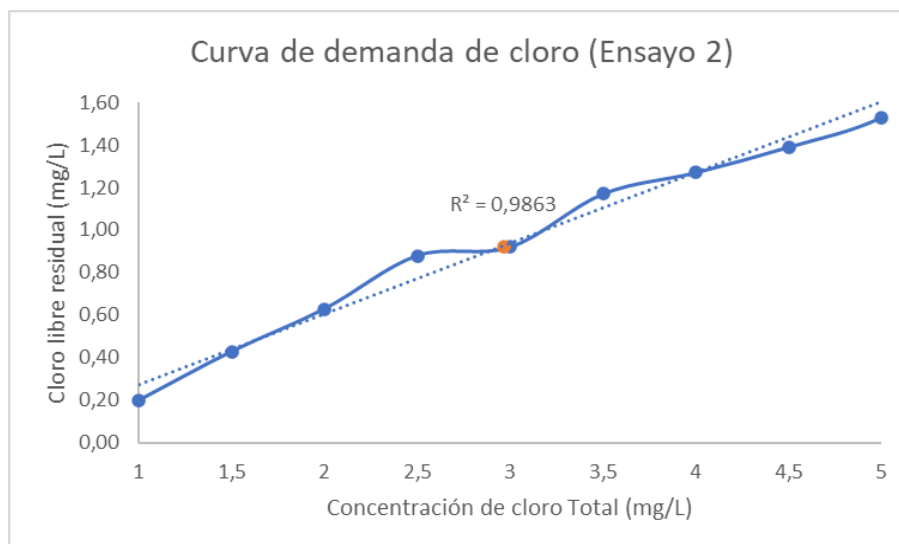


Figura 31. Curva de Demanda de Cloro de la PTAP TC (Ensayo 2).

Finalmente, la tabla 20, representa los valores correspondientes al ensayo 3, en donde, se puede visualizar desde el envase 4 hasta el envase 10, cumplen con los límites de concentración de cloro residual recomendado. Mientras que, los envases cuya concentración de cloro residual no cumplen con el límite de concentración mínima y máxima son los envases 1, 2, 3 y 11, 12, respectivamente

Tabla 20. Resultados obtenidos del ensayo 3 para la demanda de cloro.

N° envase	Cloro Total (mg/L)	Volumen (ml)	Cloro Residual (mg/L)	Cloro Combinado (mg/L)
1	0.5	0.5	0.20	0.30
2	1.0	1.0	0.22	0.78
3	1.5	1.5	0.29	1.21
4	2.0	2.0	0.47	1.53
5	2.5	2.5	0.67	1.83
6	3.0	3.0	0.71	2.29
7	3.5	3.5	0.96	2.54
8	4.0	4.0	1.16	2.84
9	4.5	4.5	1.32	3.18
10	5.0	5.0	1.48	3.52
11	5.5	5.5	1.58	3.92
12	6.0	6.0	1.41	4.90

En lo que respecta a la dosis óptima de cloro total a aplicar en la PTAP, mediante el desarrollo del tercer ensayo se determinó una concentración de 2.94 mg/L de cloro total. De igual manera esta dosis fue definida a partir de la curva de demanda de cloro correspondiente al ensayo 3, presentada en la figura 32. En cuanto al cloro residual obtenido al aplicar la dosis óptima, este corresponde a un valor de 2.93 mg/L.

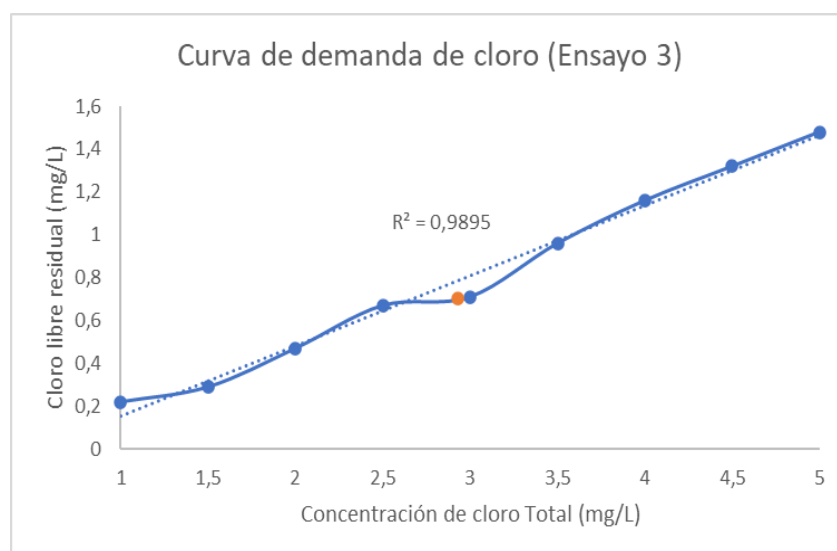


Figura 32. Curva de Demanda de Cloro de la PTAP TC (Ensayo 3).

En resumen, la tabla 21, presenta las concentraciones óptimas de hipoclorito de calcio determinadas a partir de los tres ensayos de laboratorio, como también, los valores

correspondientes a cada una de las variables fisicoquímicas y biológicas medidas en la muestra de agua.

Tabla 21. Tabla resumen de los parámetros identificados.

Parámetros	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Dosis óptima (mg/L)	2.86	2.97	2.93
Cloro residual (mg/L)	0.63	0.92	0.70
Temperatura (°C)	17.5	19.3	19.1
pH	8.29	6.50	6.28
Turbiedad (NTU)	1.00	1.00	1.00
TOC (mg/L)	2.80	1.10	0.80
Presencia de CT y CF	No	No	No

Los resultados obtenidos fueron corroborados con los de otras investigaciones como, la de Melgar et al. (2021) que desarrolló dos ensayos reportando que las concentraciones de cloro total en las cuales se determinó el punto de quiebre corresponden a los valores 2.92 mg/L y 3.09 mg/L respectivamente para cada ensayo. Sin embargo, el autor sugiere que las dosis óptimas de cloro deben ser determinadas en los periodos de invierno y verano.

Por otra parte, Mihelcic et al., (2009), desarrollaron una metodología sencilla, para determinar la dosis óptima de cloro, la cual pueda ser empleada en aquellas plantas de tratamiento ubicadas en zonas remotas o a nivel de campo. En dicho estudio, se obtuvo como resultado que la dosis óptima de cloro total correspondió a un valor de 2 mg/L.

De la misma manera, Díaz & Condezo (2017) expresan que, para que se cumpla con el límite mínimo de 0.5 ppm de cloro residual los puntos más alejados a la PTAP, la concentración de cloro residual a nivel de la planta deberá ser igual a 1.5 mg/L. A partir de ello, se determinó que la dosis óptima a emplear y la cual permita el cumplimiento de lo antes mencionado fue una concentración de 2 mg/L con una demanda de cloro de aproximadamente 0.5 mg/L.

Por su parte, Víctor et al. (2021), en su estudio manifiesta que en el distrito de Daloa cerca del 96 % de los hogares no están conectados a una red de distribución y se abastecen de agua de pozos. A partir de ello, establecen como objetivo llevar a cabo una evaluación de la demanda de cloro en el agua del pozo en el Marais District de Daloa, París. En donde, como resultados reportan que la dosis de punto de ruptura osciló entre los valores de 2 mg/L y 3 mg/L. Mientras que el cloro residual presentaba valores de 0.3 y 1.8 mg/L. Se deduce que las

variaciones se presentan como consecuencia de la presencia de compuestos minerales en las muestras de agua.

Por último, Huayllani & Cevallos (2021), desarrollaron un estudio tuvo como enfoque el determinar la relación entre la dosis de cloro y el cloro residual en la PTAP de Huancavelica, Perú. Como parte de la metodología empleada, evalúan la demanda de cloro a nivel de la planta. En donde, se reporta que como resultados que la dosis óptima de cloro se encuentra dentro de los valores de 2 mg/L - 3 mg/L. De manera que el cloro residual de salida de la planta potabilizadora presente los valores de cloro residual entre 1.36 - 1.5 mg/L respectivamente. De esta manera se cumple con lo establecido en el “Reglamento de la calidad del agua para consumo humano según el D.S. N°031-2010-SA”.

En lo que respecta al análisis de la tabla 21, las concentraciones de cloro residual correspondientes a las dosis óptimas identificadas, en todos los ensayos, se cumplen con el límite mínimo y máximo establecido en la normativa ecuatoriana. Por otra parte, las variables fisicoquímicas y biológicas evaluadas, de igual manera, cumplen con los estándares establecidos.

En cuanto, a la relación de la dosis óptima con las variables evaluadas, se reporta que:

- La turbiedad, se encuentra por debajo de los límites establecidos.
- El pH, en el Ensayo 2 - 3 presentan valores similares, sin embargo, en el Ensayo 1 se presentó un valor de 8.29, que considerando lo expresado por la CONAGUA (2007), el valor del pH sería uno de los factores por el cual el ensayo 1 reporta la concentración de cloro residual más baja. En lo que respecta a la similitud de los valores de pH, es posible que se deba a que las muestras de agua para el ensayo 2 – 3 fueron tomadas en dos días consecutivos, mientras que, para el ensayo 1 la muestra de agua se tomó con unas semanas de diferencia.
- Los valores de temperatura, de igual manera no presenta una variación significativa entre sí, y se encuentran cercanos al valor óptimo que reporta AWWA (20-25 °C) y que según CEAJALISCO (2022), los valores de temperatura de agua cercanos a 20°C y menores a 25 °C, asegura un proceso desinfección óptima, sin alterar el equilibrio ni la calidad del agua.
- En cuanto a las lecturas de carbono orgánico total, en todos los ensayos se reportan niveles bajos, de manera que existe una baja probabilidad de generación de SPD. En cuanto al cumplimiento de la concentración máxima de TOC, en la normativa ecuatoriana y OMS no se establece un límite mínimo. No obstante, en España, a través del Real Decreto 3/2023, se establece un valor máximo de 5 mg/L. De igual

manera la EPA (2011), establece un límite máximo de 2 mg/L de TOC. Por lo tanto, en todos los ensayos se cumple con los límites establecidos.

- Por otra parte, la variabilidad en las concentraciones de TOC, según Ordóñez et al. (2013), afirma que un aumento en el flujo fluvial en las fuentes hídricas provoca una mayor polución orgánica de las mismas, que, en consecuencia, afecta la calidad del agua que abastecen a las PTAP. A partir de lo antes mencionado y los resultados de TOC obtenidos, se evidencia que esta variación se debe a la presencia de precipitaciones días previos a la toma de la muestra de agua utilizada en el ensayo 1. Mientras que, en los días en los cuales se tomó las muestras de agua para el ensayo 2, 3 no se registraron fuertes precipitaciones en los días previos a la toma de la muestra.
- Finalmente, en ninguno de los ensayos se detectó la presencia de Coliformes Fecales y Coliformes Totales. Sin embargo, no se descarta la presencia de otro tipo de patógenos.

4.6.2 Determinación de la cantidad de Hipoclorito de Calcio necesaria en la dosificación en la PTAP

En el apartado anterior se determinó la concentración de dosis óptima de cloro a nivel de laboratorio, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el uso de hipoclorito de calcio implica preparar una solución madre, de la cual, a través de un proceso de goteo se aplica en el agua a tratar.

De este modo, para determinar la cantidad en peso de Hipoclorito de calcio se utilizó la ecuación 33 establecida en el manual para la cloración de agua en sistemas de tratamiento elaborado por Fustamante & PROAGUA. (2017).

$$P (g) = \frac{3600 * V_t * Q * D_{optima}}{q * \% * 10^6} \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde:

- P: Es el peso en gramos del hipoclorito de calcio (mg/L).
- V_t : Volumen del tanque dosificador (L).
- D_{optima} : Concentración de cloro total óptima (mg/L).
- Q: Caudal de ingreso por el vertedero.
- q: Caudal de goteo (L/h).
- %: Concentración de Hipoclorito de Calcio (65 %).

Tabla 22. Resultados de la cantidad en Kg de Hipoclorito de Calcio

Volumen Tanque Dosificación (L)	Concentración Óptima (mg/L)	Caudal de Goteo (L/h)	Caudal de Ingreso (L/s)	Concentración de Ca (ClO) ₂	Cantidad de Ca (ClO) ₂ (Kg)
200	2.97	3	4.015	0.65	4.4

La Tabla 22, presenta los valores de las variables utilizadas en el cálculo de los Kg necesarios de Hipoclorito de Calcio y el resultado en Kg de Ca(ClO)₂ bajo las condiciones las siguientes condiciones:

- La dosis óptima de cloro total en el agua clorada con un valor de 2.97 mg/L.
- El caudal de goteo del tanque de dosificación tenga un valor de 3 L/h, con un tiempo de duración de 65 horas aproximadamente para los 200 L de solución.
- El volumen de aforo del tanque de dosificación sea de 200 L.
- El Hipoclorito de Sodio presente una concentración del 65 %.

Cabe aclarar que, los valores como: la concentración total de cloro o dosis óptima de cloro total fue determinada en el apartado anterior y se trabajó con aquella que presentó mejores resultados. Por otra parte, el caudal de goteo fue determinado de manera empírica, tomando como referencia el tiempo en el cual, el operador de la planta abastece de una nueva solución de hipoclorito de calcio en el tanque dosificador.

Finalmente, a partir de los resultados expresados con anterioridad, se define que la dosis óptima de cloro total correspondiente a la PTAP TC corresponde a un valor de 2.97 mg/L y en cuanto a la cantidad en kilogramos de hipoclorito de calcio con concentración del 65 %, que se recomienda aplicar en el tanque dosificador de 200 litros de agua es de 4.40 Kg para un tiempo de duración de aproximadamente 65 horas.

5 Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

La evaluación espacio-temporal de la concentración de cloro libre residual en los 15 puntos de muestreo, ubicados a diferentes distancias a lo largo de la red de distribución de agua potable de Tutupali Chico, permitió la obtención de datos confiables sobre la dinámica del cloro en el sistema. Este análisis incluyó la medición de parámetros como la turbiedad, el pH y la temperatura que fueron esenciales para determinar la calidad del agua presente en la red. Los resultados indicaron que los valores de turbiedad se mantuvieron por debajo de 3 NTU, cumpliendo con la normativa nacional que establece un máximo de 5 NTU. Los valores de pH oscilaron entre 6 y 7.5, un rango óptimo para la reacción del cloro y la formación iones de hipoclorito que mejoran la eficiencia de desinfección del cloro en el agua. Además, se observó que la concentración de cloro libre residual tiende a disminuir a medida que la temperatura del agua aumenta.

A través de un ajuste lineal de los datos de cloro libre residual se determinó que, al igual que en muchas redes de agua potable el orden de reacción corresponde a una reacción de primer orden, es decir, la velocidad de la reacción del cloro depende únicamente de su concentración como reactivo.

El coeficiente de reacción del cloro con el agua (k_b) de 0.406 h^{-1} es un valor superior a comparación de estudios que utilizaron la misma metodología. Sin embargo, su valor se respalda por los meses de monitoreo analizados, ya que se obtuvieron valores concisos de la concentración de cloro residual en los distintos puntos de la red. Teniendo en la mayoría de los puntos un valor de cloro residual que está dentro del intervalo establecido en la normativa nacional. Además, según el análisis estadístico de correlación, la temperatura y k_b tuvieron una relación proporcional, es decir, a mayor temperatura el k_b también aumenta y por ende la demanda de cloro se intensifica. Por otra parte, en relación con las concentraciones de TOC evaluadas únicamente en los puntos extremos de la red, revelaron que a medida que la concentración de TOC aumenta, la demanda de cloro también tiende a seguir la misma tendencia.

El valor del coeficiente global de decaimiento (K) de 0.49 h^{-1} refleja que este valor es más atribuible a k_b que a k_w en el decaimiento del cloro, debido a que el cloro en esta red de distribución reacciona más con la masa de agua que con la pared de la tubería. Por lo que se determina que el agua puede presentar materia orgánica natural, u otros componentes como hierro, sulfatos que puede estar reaccionando directamente con el cloro, disminuyendo su

funcionalidad y evitando que el cloro libre residual se mantenga en un valor recomendado que es entre los 0.5 a 1.5 mg/L.

El coeficiente de reacción del cloro con la pared de las tuberías (k_w) corresponde a un valor de 0.079 h^{-1} , que comparado con los coeficientes de k_w reportados en otros estudios, representa fiabilidad y lógica en el contexto de la reacción del cloro en el agua. Sin embargo, la confiabilidad y representatividad del resultado no pudo ser corroborado con la medición en otros tramos de tubería debido a la complejidad del proceso, y como también, no se identificó otro tramo de tubería a lo largo de la red de distribución, el cual cumpla con las condiciones necesarias para el cálculo del coeficiente global de decaimiento (K) y en consecuencia k_w . A pesar de ello, el resultado reportado en el presente estudio, en comparación con la constante cinética k_b , refuerza que la tasa de descomposición del cloro por las reacciones con la tubería es mínima.

Los ensayos realizados en el laboratorio establecieron que la dosis óptima de cloro para la PTAP TC es de 2.97 mg/L. Esta dosis garantiza un cloro libre residual de 0.92 mg/L, lo cual aplicado a escala real aseguraría un adecuado proceso de desinfección y como también que el cloro residual a lo largo de la red de distribución se encuentre dentro de los límites recomendados. La concordancia de nuestros hallazgos con la literatura citada valida la metodología empleada en este estudio para determinar la dosis óptima de cloro. Dado que, su aplicación es adecuada en áreas con características similares a las evaluadas.

La evaluación de las distintas variables como la temperatura, pH, turbiedad y TOC, fueron medidas con el objetivo de explicar los resultados correspondientes a las variables cinéticas del cloro en el agua. Sin embargo, las concentraciones de TOC identificados en especial de los puntos más alejados de la red representan valores sumamente elevados. Aunque no existe una normativa que establezca un límite máximo permisible para el carbono orgánico total, algunos estudios establecen que concentraciones elevadas aumentan la probabilidad de formación de subproductos de la desinfección del agua. Por tal motivo, concluimos que es importante la evaluación de esta variable. No obstante, en el presente estudio, solo se realizó una medición de TOC debido a la falta de disponibilidad de equipos y reactivos para realizar las mediciones en todos los puntos de la red. Además, la evaluación de las variables influyentes en el proceso de desinfección no formaba parte de los objetivos planteados en este estudio. A pesar de estas limitaciones, se realizaron las mediciones para evidenciar el estado de la calidad del agua en el sistema de agua potable de Tutupali Chico.

5.2 Recomendaciones

- Tras la determinación del coeficiente de reacción del cloro con el agua (k_b) y del coeficiente de reacción del cloro con la pared de la tubería (k_w), se puede realizar una modelación hidráulica de la red de distribución. Esto permitiría la identificación de posibles puntos críticos en donde la concentración de cloro residual podría encontrarse por debajo de los niveles de desinfección establecidos en la normativa.
- En el desarrollo de los monitoreos, es importante realizar una planificación meticulosa para que la toma de muestras y las mediciones de cloro residual se puedan realizar de manera simultánea sin afectar los periodos de tiempo para las siguientes mediciones de cloro residual.
- Verificar que todos los puntos de monitoreo tengan un suministro continuo de agua potable y que la PTAP cuente con el suministro constante de cloro empleado en la desinfección del agua. Para asegurar la validez de las mediciones y la continuidad en el proceso de cloración.
- Mantener las muestras de agua a una temperatura constante y protegerlas de la exposición a la luz solar, ya que, a partir de los resultados obtenidos la temperatura es la variable que más correlación presentó con respecto a la concentración de cloro residual en las muestras.
- En el análisis de la relación entre la constante de reacción del cloro con el agua y la materia orgánica natural, se identificó una relación similar a la observada en otros estudios. Se recomienda evaluar la concentración de esta variable, en la medida de lo posible, en todos los puntos de la red y durante todo el periodo de monitoreo. Teniendo a consideración el objetivo y la relevancia de esta variable dentro del contexto del estudio.
- Otro factor importante es verificar la concentración de dosificación de cloro a nivel de la planta, de manera que, todos los monitoreos realizados tengan una mayor representatividad del comportamiento del cloro a lo largo de la red de distribución y de las épocas en las cuales fueron realizadas las lecturas de cloro.
- Realizar la determinación de la dosis óptima de cloro a punto de quiebre tanto en invierno como en verano. Esto permitirá representar adecuadamente la demanda de cloro, misma que varía entre estaciones, optimizando la dosificación para asegurar la calidad del agua durante todo el año.

6 Capítulo VI

6.1 Referencias bibliográficas

- Alcocer, V., Tzatchkov, V., & Arreguín, F. (2004). Modelo de calidad del agua en redes de distribución. *Ingeniería Hidráulica en México*, XIX(2), 77-88.
<http://hdl.handle.net/123456789/743>
- Arboleda, J., Buitrago, I., & Jaramillo, L. (2023). *Teoría y Practica de la Purificación del Agua* (Cuarta Edición ed.). ECOE Ediciones.
- AWWA Staff. (2006). *Water Chlorination/chloramination Practices and Principles* (2da ed.). American Water Works Association.
- BOE. (2023). *Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro*. Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática.
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2023-628&p=20230111&tn=1#ai>
- BOECO. (2019). *MEDIDOR DE SOBREMESA BOECO PH/ORP/TEMP MODELO BT-700*.
<https://www.boeco.com/electrochemistry/boeco-ph-mv-ion-temp-bench-top-meter-model-bt-700&sk=99>
- Bruni, M. A., & Spuhler, D. (2019). Slow Sand Filtration. SSWM.info. <https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-purification/hardwares/semi-centralised-drinking-water-treatments/slow-sand-filtration>
- Castro, P., & Neves, M. (2003). Chlorine decay in water distribution systems case study – lousada network. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 2(2), 261-266.
- CEAJALISCO. (2022). *Manual para desinfección de Sistemas de Agua Potable*. Comisión del Agua de Jalisco.
https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/manuales_tecnicos/img/Manual%20para%20Desinfección%20de%20Sistemas%20de%20Agua%20Potable.pdf

Comisión Nacional del Agua. (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DESINFECCIÓN PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO*.

Comisión Nacional del Agua. (2008). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Costa, J., Mesquita, E., Ferreira, F., Fegueireno, D., Joao, M. R., & Viegas, R. (2023). Modeling Chlorine Decay in Reclaimed Water Distribution Systems—A Lisbon Area Case Study. *MDPI Sustainability*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/su152316211>

Da Silveira, B. I. (2015). *Cinética Química das Reações Homogêneas*. Blucher.

Díaz, V., & Condezo, J. M. (2017). *Manual de Operación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Millpo*. EMAPA HUANCVELICA.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2916900/MANUAL%20DE%20OPERACION%20DE%20LA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20POTABLE%20MILLPO.pdf>

Estrin, D., Bilmes, S. A., & Domenianni, L. I. (2024). *Conceptos y modelos para comprender la química*. Eudeba.

ETAPA EP. (s.f.). *Catastro de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tutupali Chico*.

Fisher, I., Kastl, G., & Sathasivan, A. (2012). A suitable model of combined effects of temperature and initial condition on chlorine bulk decay in water distribution systems. *ScienceDirect*, 46(10), 3293-3303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.017>

Fustamante, N., & PROAGUA. (2017). *MANUAL PARA LA CLORACIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL ÁMBITO RURAL*. Recuperado de:

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GIZ%202017.%20Manual%20para%20la%20cloración%20del%20agua%20en%20sistemas%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable.pdf

- García Ávila, F. F. (2019). Modelo de decaimiento de cloro libre en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Azogues, Ecuador.
- García Ávila, F., Sánchez-Alvarracín, C., Cadme-Galabay, M., Conchado-Martínez, J., García-Mera, G., & Zhindón-Arévalo, C. (2020). Relationship between chlorine decay and temperature in the drinking water. *MethodsX*, 7, 101002.
- Garros, M. C., & Safar, E. (2020). *Agua segura como derecho humano*. Ediciones Universidad Católica de Salta.
- Gholami, F. (2022). Relationship Between Environment Temperature, TOC, Turbidity, and HPC on Free Residual Chlorine in Municipal Drinking Water Distribution Networks (WDNs): A Case Study (Abadan, Iran). *Springer Link*, 292, 305 - 314.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-5783-3_24
- HACH. (2015). *Colorímetro portátil DR/890*. <https://ca.hach.com/dr-890-portable-colorimeter/product?id=14534087114>
- HACH. (2017). *2100P ISO Turbidímetro portátil*. <https://es.hach.com/2100p-iso-turbidimetro-portatil-iso-eu/product?id=25144130066>
- Hauser, B. (2002). *Drinking Water Chemistry: A Laboratory Manual*. Taylor & Francis.
- House, J. E. (2007). *Principles of Chemical Kinetics*. Elsevier Science.
- Huayllani, N., & Cevallos, A. (2021). *Relación entre la dosis de cloro y cloro residual libre en el sistema de agua potable en la ciudad de Huancavelica-2021*. Perú, Lima.
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/65317/Huayllani_LNM-Zevallos_SA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Igumbor, J. O., Obi, G. L., Momba, M., & Sami, A. (2018). Interplay of factors involving chlorine dose, turbidity flow capacity and pH on microbial quality of drinking water in small water treatment plants. *American Journals*, 34(5). doi: 10.4314/wsa.v34i5.180653
- LeChevallier, M. W., Evans, T. M., & Saidler, R. J. (1981). Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water. *AMS JOURNALS*, 42(1).
<https://doi.org/10.1128/aem.42.1.159-167.1981>

- Liao, P., Zhang, T., Fang, L., Jiang, R., & Wu, G. (2022). Chlorine decay and disinfection by-products transformation under booster chlorination conditions: A pilot-scale study. *Science of The Total Environment*, 851, 158115.
- Lozano-Rivas, W. A., & Lozano Bravo, G. (2015). *Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*. Universidad Piloto de Colombia.
- Martínez, M., Mendoza, J., Medrano, B., Gómez, L., & Zafra, C. (2020). Evaluation of turbidity as a parameter indicator of treatment in a drinking water treatment plant. *Revista UIS Ingeniería*, 19(1), 14.24. doi: 10.18273/10.18273/revuin.v19n1-2020001
- Mays, L. W. (2011). *Water Resources Engineering* (L. W. Mays, Ed.). Wiley.
- Mazhar, M. A., Khan, N. A., Ahmed, S., Khan, A. H., Hussain, A., Rahisuddin, Changani, F., Yousefi, M., Ahmadi, S., & Vambol, V. (2020). Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water – A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123159>
- Melgar, Y., Duarte, B., Lopez, E., & Gonzalo, P. (2021). Construcción de una curva de demanda de cloro para la planta potabilizadora Jaime Díaz Quintero en La Chorrera, Panamá. *Revistas UTP*. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3215/3894>
- Mendez, J. I., Barcia, M. B., Mejia, L. J., Cornejo, Á. K., Salas, C. A., & Valverde, P. E. (2023). Assessment of the Performance of a Water Treatment Plant in Ecuador: Hydraulic Resizing of the Treatment Units. *MDPI*. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/54244/3/T-70644%20MEJIA%20BUSTAMANTE.pdf>
- Mihelcic, J. R., Fry, P., Myre, E., Linda, A., Philips, D., & Barkdoll, B. (2009). Field guide to environmental engineering for development workers : water, sanitation, and indoor air. *American Society of Civil Engineers*.
- Mohamen, H., Brown, J., Njee, R., Classen, T., Malebo, H., & Mbuligwe, S. (2015). Point-of-use chlorination of turbid water: results from a field study in Tanzania. *Journal of Water and Health*, 13(2), 544-552. <https://doi.org/10.2166/wh.2014.001>

Mompremier, R. (2015). *DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERÍAS A PRESIÓN*.

México D.F.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7305/Tesis%20de%20doctorado%20Rojacques%20Mompremier.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nono, D., Phillimon, O., & Parida, B. (2019). Assessment of probable causes of chlorine decay in water distribution systems of Gaborone city, Botswana. *Water SA*, 45(2), 190-198. <https://dx.doi.org/10.4314/wsa.v45i2.05>

Nouri, S. A., Dehestani, A. S., & Maleki, A. (2015). Effect of temperature on pH, turbidity, and residual free chlorine in Sanandaj Water Distribution Network, Iran. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 3(3), 188-195.

OMS. (2009). *Mediciones de Cloro en el Agua*. Guías técnicas sobre saneamiento, agua y salud.

Paredes, M. (2023). *EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE CLORO EN LA ELIMINACIÓN BACTERIANA DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DEL CENTRO POBLADO SUPTE SAN JORGE, 2023*. Tingo María, Peru.
<https://repositorio.unas.edu.pe/items/ae81c1f1-f537-4b69-a58f-28fba4a4d764>

Patil, K., & Jariwala, N. D. (2017). Determination of Wall-Decay Coefficient (Kw) for Water Distribution System of Dhule City using EPANET. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(3).

Pérez, R., Martínez-Torrents, A., Martínez, M., Grau, S., Vinardell, L., Tomàs, R., & Jubany, I. (2022). Chlorine concentration modelling and supervision in water distribution systems. *Sensors*, 22(15), 5578.

Pizzi, N. G. (2005). *Water Treatment Operator Handbook*. American Water Works Association.

Punmia, B.C., Jain, A. K., & Jain, A. K. (1995). *Water Supply Engineering*. Laxmi Publications (P) LTD.

Ramirez, F. (2018). *Tratamiento de Desinfección del Agua Potable* (II ed.). ISBN: 84-933694-3-8

Ren, H., & Zhang, X. (Eds.). (2020). *High-Risk Pollutants in Wastewater*. Elsevier Science.

Reyes, S. (2017). Demanda de Cloro y Punto de Quiebre. *Academia*.

https://www.academia.edu/34926970/Demanda_de_Cloro_y_punto_de_quiebre

Romero, J. A. (2000). *Potabilización del Agua* (3ra ed.). ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.

Romero, J. A. (2009). *Calidad del agua*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rossman, L. A., Clark, R. M., & Grayman, W. M. (1994). Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of environmental engineering*, 120(4), 803-820.

Sánchez, L., Rodríguez, S., Escobar, J., & Torres, P. (2010). Modelación del cloro residual y subproductos de la desinfección en un sector piloto del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali. *Ingeniería y Competitividad*, 12(1), 127-138.

https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2706/3570

Sánchez Calvo, R., Castañón Lión, G., & Gil Rodríguez, M. (2017). *Proyecto de instalación de redes de abastecimiento y distribución de agua y saneamiento*. Ediciones Paraninfo, S.A.

Sper Scientific Direct. (2020). *Termómetro Básico Tipo K/J*.

<https://sperdirect.com/products/basic-type-k-j-thermocouple-probe-thermometer>

Shamrukh, M., & Hassan, Y. (2005). Chlorination and optimal chlorine dosage for Nile water. In Proc. First Ain Shams University Int. Conf. on Environmental Engineering, ASCEE (Vol. 1, pp. 644-654).

Valencia, J. A. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3ra ed.). McGraw-Hill Interamericana S.A. Sociedad Extranjera.

Victor, K., Ohou, M. J., Konan, K., & Dongui, B. (2021). Determination of Water quality and Chlorine demand in Traditional wells of Marais district (Daloa, Côte d'Ivoire).

International Journal of ChemTech Research, 14(2), 283-289.

[https://www.sphinxesai.com/2021/ch_vol14_no2/1/\(283-289\)V14N2CT.pdf](https://www.sphinxesai.com/2021/ch_vol14_no2/1/(283-289)V14N2CT.pdf)

Vidal, R., Martinez, F., & Ayza, M. (1994). APLICACIONES DE LOS MODELOS DE CALIDAD EN LA SIMULACIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. *Ingeniería del Agua*, 1(3).

https://watermark.silverchair.com/ia19942644.pdf?token=AQECAHi208BE49Oan9kKhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAAvwwggL4BgkqhkiG9w0BBWagggLpMIIC5QIBADCCAt4GCSqGSib3DQEHATAeBgIghkgBZQMEAS4wEQQMRZmOYSqOn8ylwd8RAgEQgIIICr1iEJ8T4sYfv_yHJONqxt-_z3_6RHqar9DTgzl3q9z604

Viegas, R., Covas, D., & Menaia, J. (2015). Modelling chlorine residual decay as influenced by temperature. *Water and Environment Journal*, 29, 331-337.

<https://doi.org/10.1111/wej.12122>

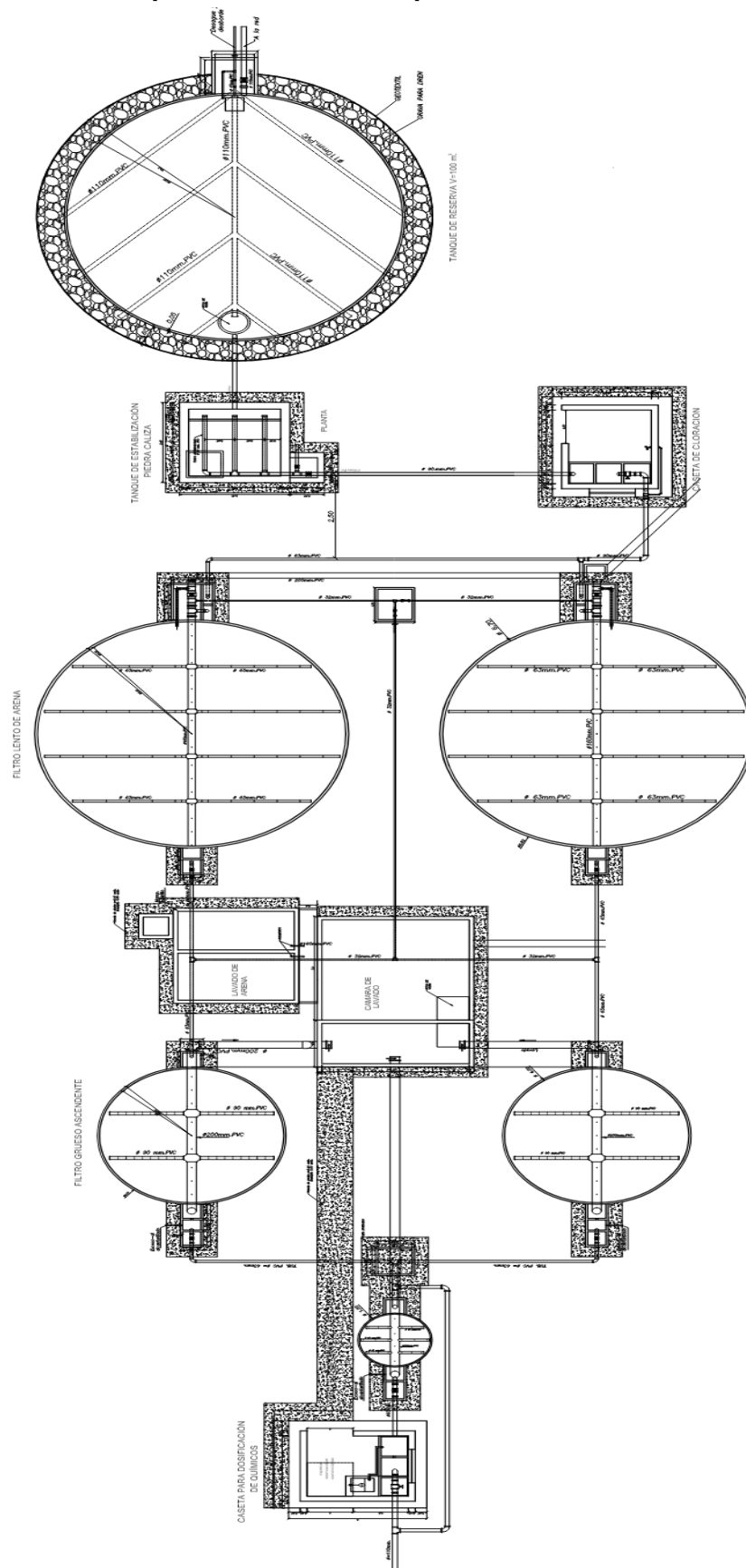
Vuta, L. I., & Dumitran, G. E. (2011). Some Aspects Regarding Decay in the Water Distribution Network. *Air and Water - Components of Environment*.

https://aerapa.conference.ubbcluj.ro/2011/PDF/Vuta_Dumitran.pdf

Weber, W. J. (1979). *Control de la calidad del agua*. Editorial Reverte.

7 Capítulo VII: Anexos

7.1 Anexo A. Vista superior PTAP de Tutupali Chico



7.2 Anexo B. Registro Fotográfico de los Equipos y Reactivos

Nombre del Equipo	Fotografía
Colorímetro	
Turbidímetro	
Termómetro	
pHmetro	

Nombre del Reactivo	Fotografía
Reactivos para medir cloro libre DPD para 10 ml.	

7.3 Anexo C. Fichas de muestreo para levantamiento de datos

PUNTO 1: Tanque de Reserva de la PTAP de Tutupali Chico																																									
			Ubicación: 2° 59' 50.4" S 79° 5' 21.5" W																																						
			Distancia desde PTAP (m): 0																																						
<table><tr><th colspan="3">Temperatura (°C)</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>16.0</td><td>13.5</td><td>10.5</td></tr><tr><th colspan="3">pH</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>7</td><td>6.5</td><td>6.01</td></tr><tr><th colspan="3">Turbiedad (NTU)</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>3</td><td>1.5</td><td>1</td></tr><tr><th colspan="3">Concentración inicial (mg/L)</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>1.10</td><td>0.72</td><td>0.32</td></tr></table>						Temperatura (°C)			Max	Media	Min	16.0	13.5	10.5	pH			Max	Media	Min	7	6.5	6.01	Turbiedad (NTU)			Max	Media	Min	3	1.5	1	Concentración inicial (mg/L)			Max	Media	Min	1.10	0.72	0.32
Temperatura (°C)																																									
Max	Media	Min																																							
16.0	13.5	10.5																																							
pH																																									
Max	Media	Min																																							
7	6.5	6.01																																							
Turbiedad (NTU)																																									
Max	Media	Min																																							
3	1.5	1																																							
Concentración inicial (mg/L)																																									
Max	Media	Min																																							
1.10	0.72	0.32																																							
FECHAS DEL MONITOREO																																									
Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6																																				
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024																																				

PUNTO 2: Barrio La Inmaculada					
					
FECHAS DEL MONITOREO					
Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

Ubicación:	2° 59' 22.9" S 79° 5' 13.7" W	
Distancia desde PTAP (m):	1125.43	

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
16.8	15.2	12.2
pH		
Max	Media	Min
7.1	7	6.97
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
2	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.72	0.53	0.09

PUNTO 3: Barrio Cruz Loma																																									
																																									
						Ubicación:		2° 59' 26.5" S 79° 5' 2.0" W																																	
						Distancia desde PTAP		1065.94																																	
<table><tr><th colspan="3">Temperatura (°C)</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>18.6</td><td>16.9</td><td>14.0</td></tr><tr><th colspan="3">pH</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>7.1</td><td>7</td><td>6.99</td></tr><tr><th colspan="3">Turbiedad (NTU)</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>2</td><td>1.3</td><td>1</td></tr><tr><th colspan="3">Concentración inicial (mg/L)</th></tr><tr><th>Max</th><th>Media</th><th>Min</th></tr><tr><td>0.77</td><td>0.42</td><td>0.18</td></tr></table>						Temperatura (°C)			Max	Media	Min	18.6	16.9	14.0	pH			Max	Media	Min	7.1	7	6.99	Turbiedad (NTU)			Max	Media	Min	2	1.3	1	Concentración inicial (mg/L)			Max	Media	Min	0.77	0.42	0.18
Temperatura (°C)																																									
Max	Media	Min																																							
18.6	16.9	14.0																																							
pH																																									
Max	Media	Min																																							
7.1	7	6.99																																							
Turbiedad (NTU)																																									
Max	Media	Min																																							
2	1.3	1																																							
Concentración inicial (mg/L)																																									
Max	Media	Min																																							
0.77	0.42	0.18																																							
<table><tr><th colspan="6">FECHAS DEL MONITOREO</th></tr><tr><th>Monitoreo 1</th><th>Monitoreo 2</th><th>Monitoreo 3</th><th>Monitoreo 4</th><th>Monitoreo 5</th><th>Monitoreo 6</th></tr><tr><td>18/08/2023</td><td>29/09/2023</td><td>27/10/2023</td><td>26/02/2024</td><td>28/03/2024</td><td>18/04/2024</td></tr></table>						FECHAS DEL MONITOREO						Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6	18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024																		
FECHAS DEL MONITOREO																																									
Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6																																				
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024																																				

PUNTO 4: Camino a la PTAP de Tutupali Chico



Ubicación:	2° 59' 31.1" S 79° 5' 10.8" W
Distancia desde PTAP (m):	782.88

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
18.5	16.6	13.3
pH		
Max	Media	Min
7	6.8	6.62
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
2	1.3	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.89	0.44	0.07

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 5: Barrio Rosas



Ubicación:	2° 59' 30.2" S 79° 4' 55.6" W
Distancia desde PTAP (m):	1385.4

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
18.0	14.5	11.2
pH		
Max	Media	Min
7	7	6.93
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
3	1.8	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.90	0.58	0.19

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 6: Barrio Hera



Ubicación:	2° 59' 50.6" S 79° 4' 55.9" W
Distancia desde PTAP (m):	2115.54

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
20.3	17.8	15.2
pH		
Max	Media	Min
7.2	7.1	6.95
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
3	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.77	0.44	0.09

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 7: Entrada Via a Machay



Ubicación:	2° 59' 34.8" S 79° 4' 36.6" W
Distancia desde PTAP	2039.9

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
20.8	16.6	13.4
pH		
Max	Media	Min
7.6	7.2	7
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
3	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.88	0.58	0.15

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 8: Canchas Gool Garden



Ubicación:	2° 59' 23.6" S 79° 4' 23.5" W
Distancia desde PTAP (m):	2631.1

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
18.7	15.9	13.4
pH		
Max	Media	Min
7.2	7.1	7.06
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
3	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.85	0.51	0.12

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 9: Hacienda Sigüenza



Ubicación:	2° 59' 28.58" S 79° 4' 31.29" W
Distancia desde PTAP (m):	3470.9

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
18.7	17.0	15
pH		
Max	Media	Min
7.2	7.1	7
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
2	1.3	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.89	0.68	0.52

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 10: Capulispamba



Ubicación:	2° 59' 35.50" S 79° 4' 22.73" W
Distancia desde PTAP (m):	2595.8

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
18.8	16.2	13.4
pH		
Max	Media	Min
7.1	7	6.84
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
2	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.89	0.67	0.35

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 11: Barrio Acchayacu



Ubicación:	3° 0' 2.29" S 79° 4' 26.79" W
Distancia desde PTAP (m):	3275.7

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
20.3	16.7	14
pH		
Max	Media	Min
7.2	7	6.85
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
2	1.3	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
1.02	0.64	0.33

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 12: Estadio de Tutupali Chico



Ubicación:	2° 59' 41.66" S 79° 4' 30.23" W
Distancia desde PTAP (m):	2475.4

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
20.2	16.0	12
pH		
Max	Media	Min
7.1	6.8	6.29
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
3	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.86	0.47	0.12

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 13: Escuela "Francisco Moscoso"



Ubicación:	2° 59' 40.53" S 79° 4' 33.73" W
Distancia desde PTAP (m):	2349.2

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
19.7	15.9	12.6
pH		
Max	Media	Min
7.1	7	6.74
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
2	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.89	0.51	0.27

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 14: Hacienda San Andrés



Ubicación:	2° 59' 13.06" S 79° 4' 15.38" W
Distancia desde PTAP (m):	3207

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
20.7	17.1	15
pH		
Max	Media	Min
7.3	7.1	6.93
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
3	1.5	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.87	0.52	0.12

FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

PUNTO 15: Quinta Guillermina



Ubicación:	2° 58' 47.87" S 79° 4' 3.41" W
Distancia desde PTAP (m):	4162.9

Temperatura (°C)		
Max	Media	Min
21.1	19.7	17.6
pH		
Max	Media	Min
7.2	7.1	6.92
Turbiedad (NTU)		
Max	Media	Min
4	2	1
Concentración inicial (mg/L)		
Max	Media	Min
0.64	0.48	0.28

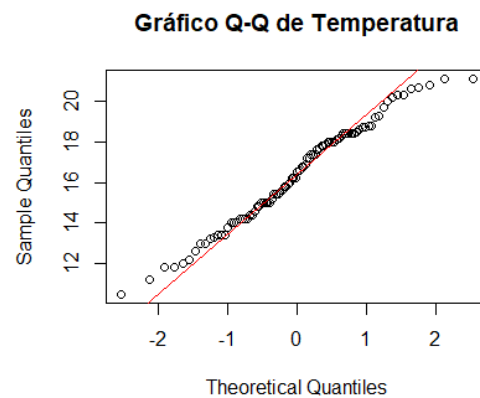
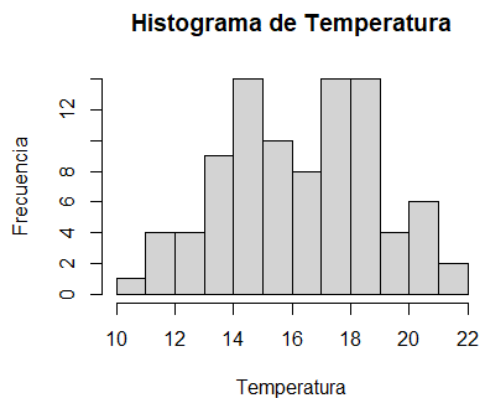
FECHAS DEL MONITOREO

Monitoreo 1	Monitoreo 2	Monitoreo 3	Monitoreo 4	Monitoreo 5	Monitoreo 6
18/08/2023	29/09/2023	27/10/2023	26/02/2024	28/03/2024	18/04/2024

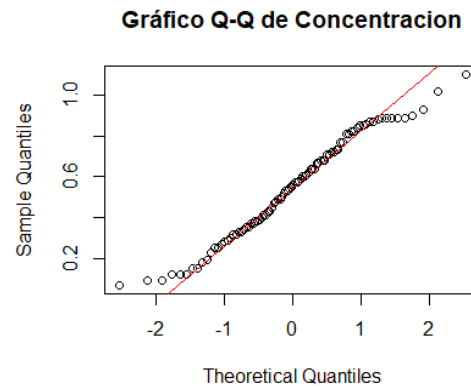
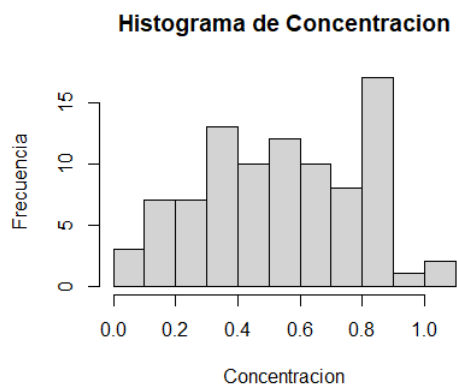
7.4 Anexo D. Resultados de los test aplicados en la evaluación de la relación entre la temperatura - concentración de cloro residual

7.4.1 Resultados del Test de Normalidad

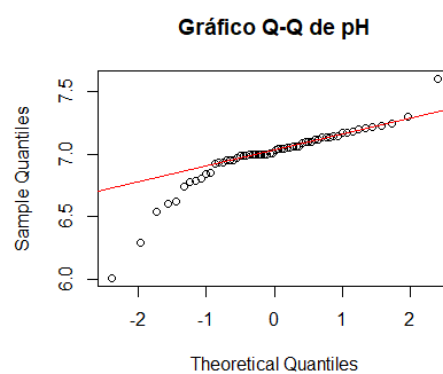
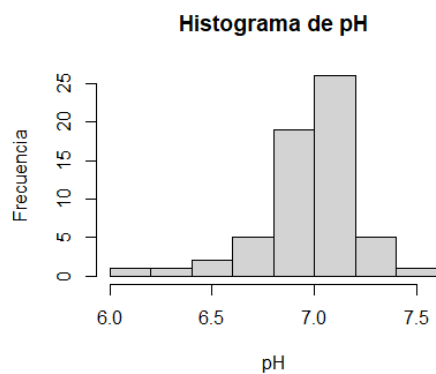
7.4.1.1 Temperatura



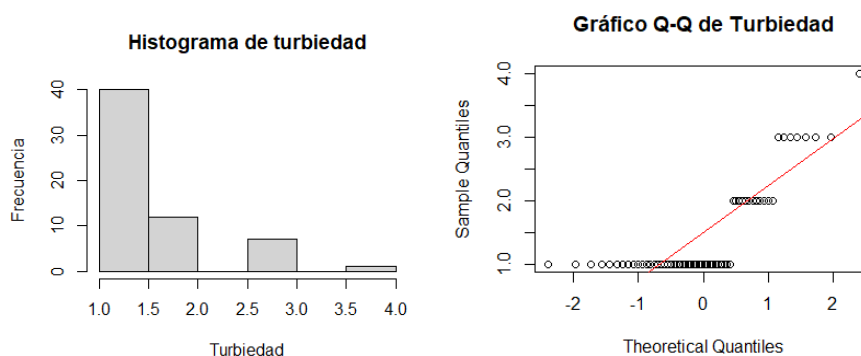
7.4.1.2 Concentración de Cloro residual libre



7.4.1.3 pH



7.4.1.4 Turbiedad



7.4.2 Resultados del Test de Normalidad de Anderson-Darling

```
Anderson-Darling normality test
data: datos$concentracion
A = 0.63379, p-value = 0.09555
```

```
Anderson-Darling normality test
data: datos$Temperatura
A = 0.5362, p-value = 0.1653
```

```
Anderson-Darling normality test
data: datos$pH
A = 2.8233, p-value = 3.437e-07
```

```
Anderson-Darling normality test
data: datos$turbiedad
A = 9.2346, p-value < 2.2e-16
```

Test de Normalidad para Concentración de Cloro Residual Libre, Temperatura, pH y Turbiedad

7.4.3 Resultados de la prueba de correlación de Pearson

```
Pearson's product-moment correlation
data: datos$Temperatura and datos$concentracion
t = -6.1468, df = 88, p-value = 2.253e-08
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.6781904 -0.3846410
sample estimates:
      cor
-0.5480748
```

7.4.4 Resultados de la prueba de correlación de Spearman

7.4.4.1 Concentración de cloro residual – pH

```
Spearman's rank correlation rho  
data: grupo1 and grupo2  
s = 37947, p-value = 0.6799  
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0  
sample estimates:  
rho  
-0.05436917
```

Grupo 1: Concentración de Cloro residual; Grupo 2: pH

7.4.4.2 Concentración de cloro residual – Turbiedad

```
data: grupo1 and grupo2  
s = 49788, p-value = 0.002498  
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0  
sample estimates:  
rho  
-0.3833751
```

Grupo 1: Concentración de Cloro residual; Grupo 2: Turbiedad

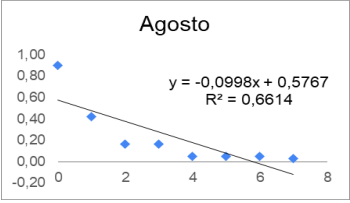
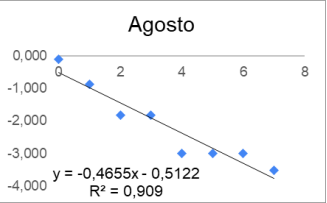
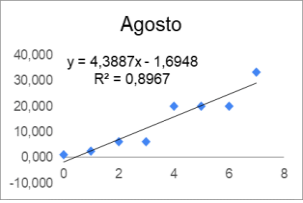
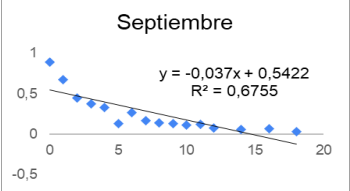
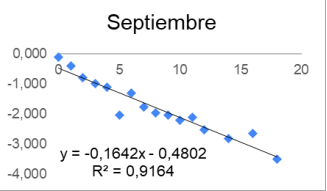
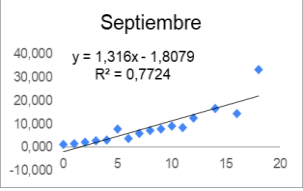
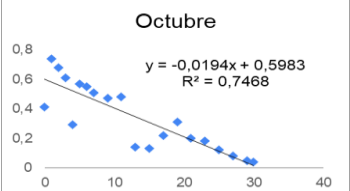
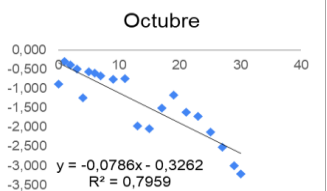
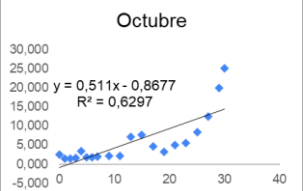
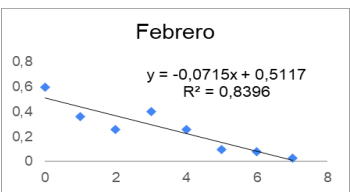
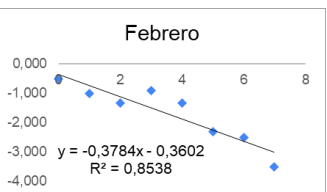
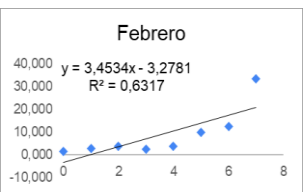
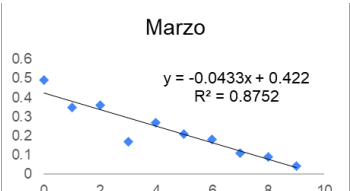
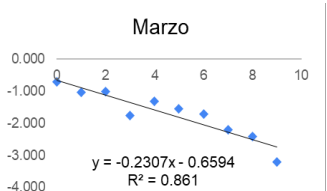
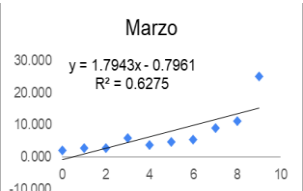
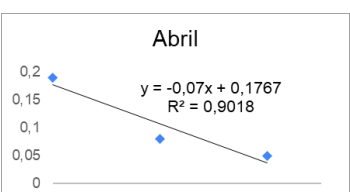
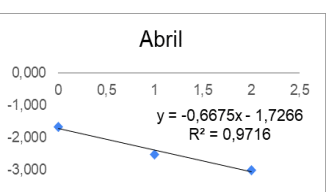
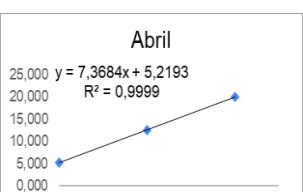
7.5 Anexo E. Gráficas de Orden de Reacción

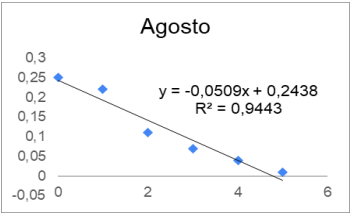
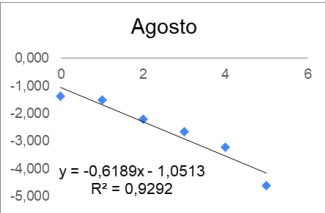
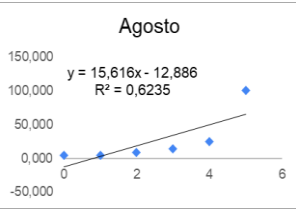
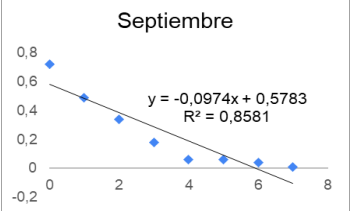
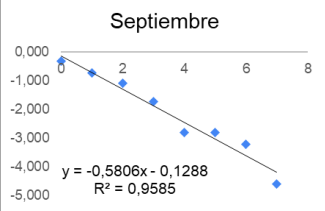
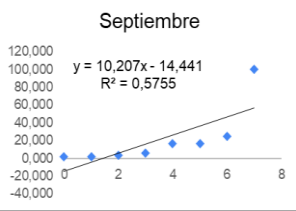
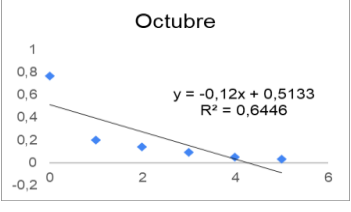
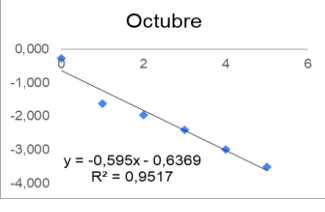
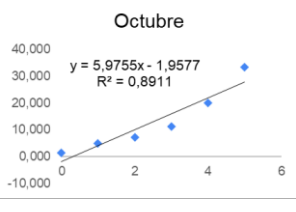
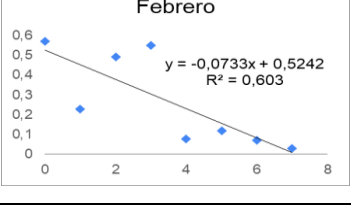
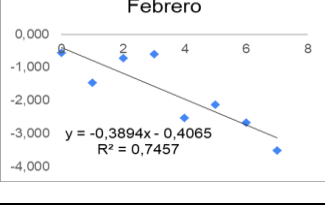
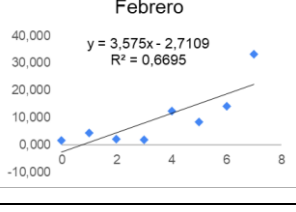
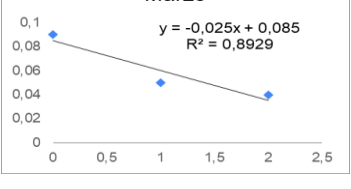
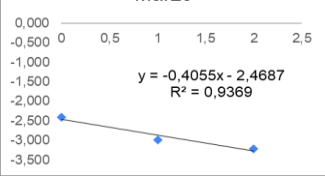
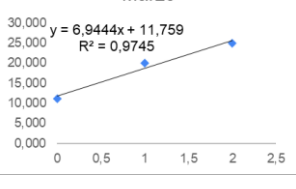
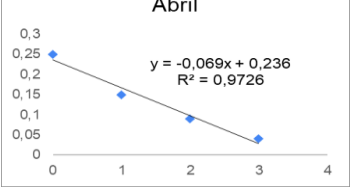
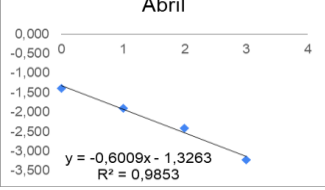
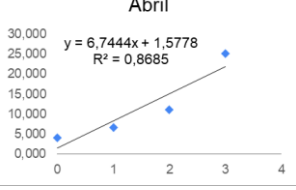
PUNTO 1. Tanque de Reserva PTAP			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0232x + 0,6051$ $R^2 = 0,7793$	Agosto $y = -0,087x - 0,3515$ $R^2 = 0,9333$	Agosto $y = 0,5175x - 0,573$ $R^2 = 0,7217$
Septiembre	Septiembre $y = -0,0408x + 0,5894$ $R^2 = 0,723$	Septiembre $y = -0,1798x - 0,402$ $R^2 = 0,8994$	Septiembre $y = 1,4371x - 1,4411$ $R^2 = 0,8099$
Octubre	Octubre $y = -0,0193x + 0,6297$ $R^2 = 0,7436$	Octubre $y = -0,0724x - 0,2525$ $R^2 = 0,9159$	Octubre $y = 0,4746x - 1,6096$ $R^2 = 0,5876$
Febrero	Febrero $y = -0,073x + 0,4887$ $R^2 = 0,5878$	Febrero $y = -0,3544x - 0,7559$ $R^2 = 0,893$	Febrero $y = 3,3433x - 0,7914$ $R^2 = 0,8752$
Marzo	Marzo $y = -0,112x + 0,428$ $R^2 = 0,9148$	Marzo $y = -0,7026x - 0,6218$ $R^2 = 0,9751$	Marzo $y = 7,3651x - 2,5238$ $R^2 = 0,831$
Abril	Abril $y = -0,087x + 0,243$ $R^2 = 0,6562$	Abril $y = -0,7101x - 1,5942$ $R^2 = 0,7748$	Abril $y = 9,0625x + 5,5208$ $R^2 = 0,8939$

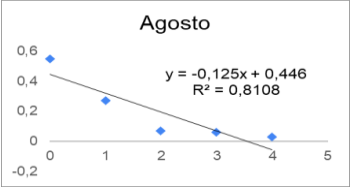
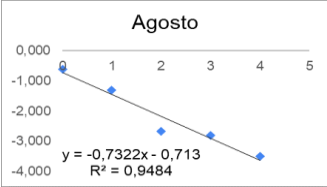
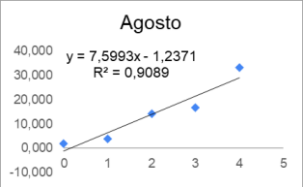
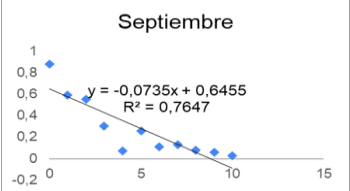
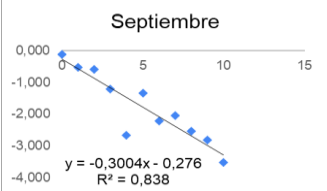
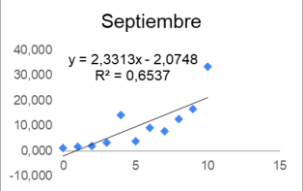
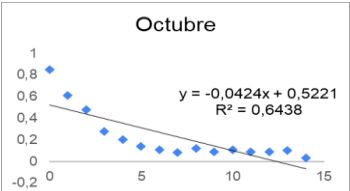
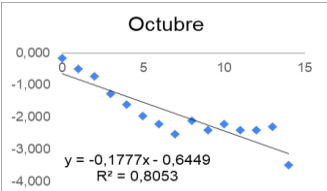
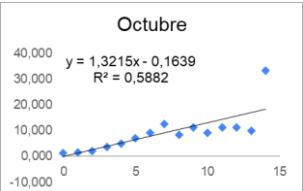
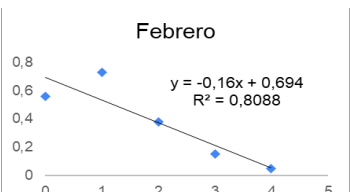
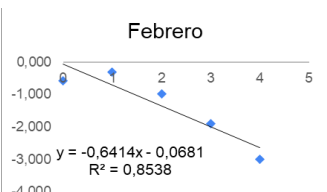
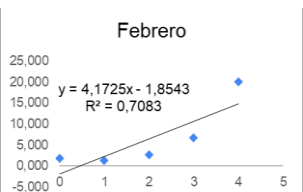
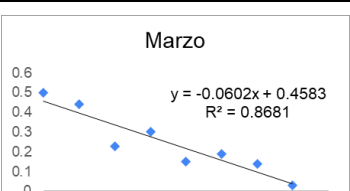
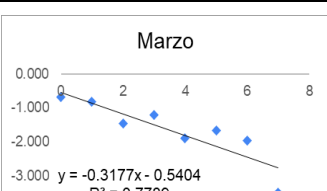
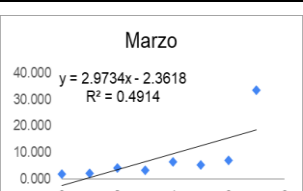
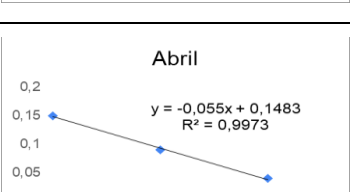
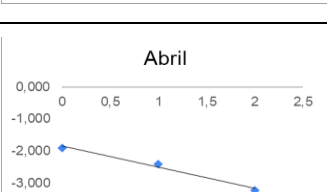
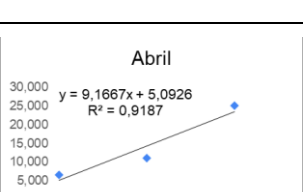
PUNTO 2. Barrio Inmaculada			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0546x + 0,3586$ $R^2 = 0,4814$	Agosto $y = -0,3817x - 1,1271$ $R^2 = 0,7557$	Agosto $y = 8,2865x - 7,1975$ $R^2 = 0,5429$
Septiembre	Septiembre $y = -0,0579x + 0,5435$ $R^2 = 0,8754$	Septiembre $y = -0,3333x - 0,2336$ $R^2 = 0,9886$	Septiembre $y = 3,8486x - 6,7732$ $R^2 = 0,8208$
Octubre	Octubre $y = -0,1369x + 0,6205$ $R^2 = 0,8468$	Octubre $y = -0,6324x - 0,2292$ $R^2 = 0,9398$	Octubre $y = 5,7871x - 3,5942$ $R^2 = 0,774$
Febrero	Febrero $y = -0,0191x + 0,5767$ $R^2 = 0,7594$	Febrero $y = -0,0796x - 0,3556$ $R^2 = 0,8307$	Febrero $y = 0,5685x - 1,3757$ $R^2 = 0,5794$
Marzo	Marzo $y = -0,02x + 0,0867$ $R^2 = 0,9231$	Marzo $y = -0,2939x - 2,4451$ $R^2 = 0,9542$	Marzo $y = 4,4444x + 11,481$ $R^2 = 0,9796$
Abril	Abril $y = -0,094x + 0,291$ $R^2 = 0,94$	Abril $y = -0,7677x - 1,0701$ $R^2 = 0,9795$	Abril $y = 9,5486x - 0,8681$ $R^2 = 0,8151$

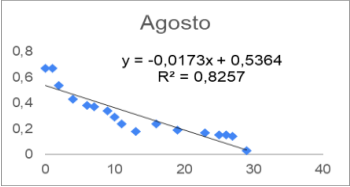
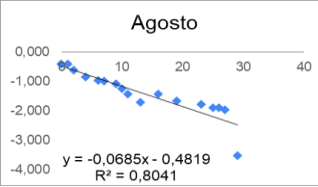
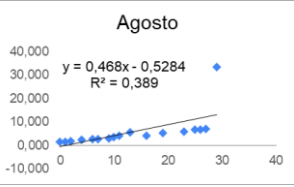
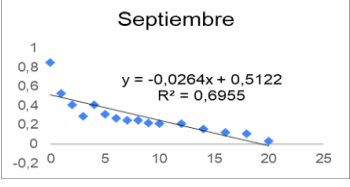
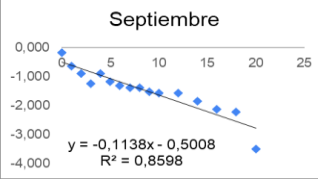
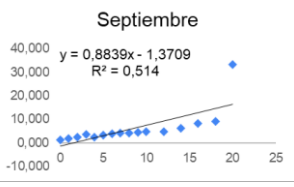
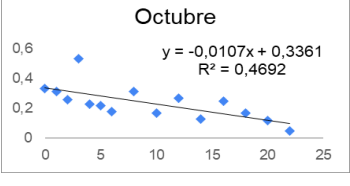
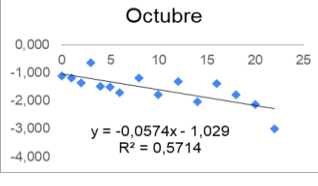
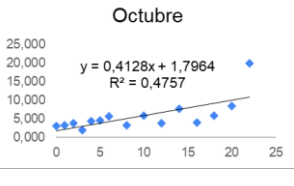
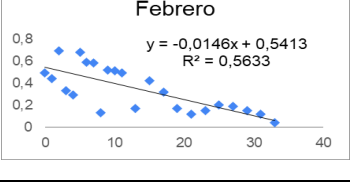
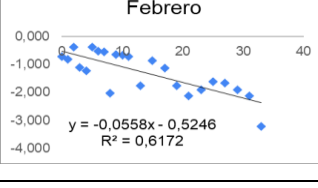
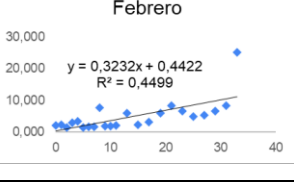
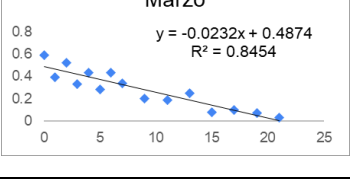
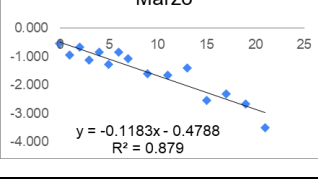
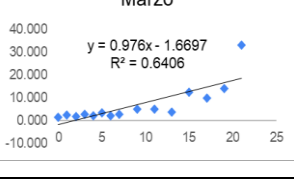
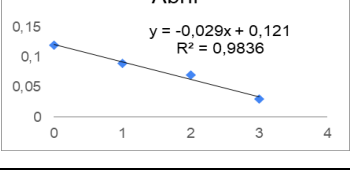
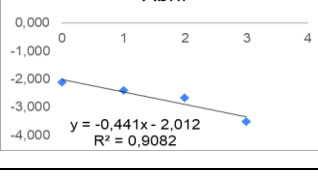
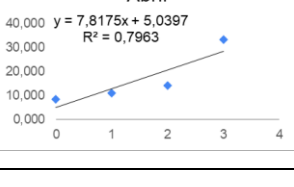
PUNTO 3. Barrio Cruz Loma			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0621x + 0,3121$ $R^2 = 0,4465$	Agosto $y = -0,3773x - 1,5543$ $R^2 = 0,6729$	Agosto $y = 4,5347x + 5,4859$ $R^2 = 0,9267$
Septiembre	Septiembre $y = -0,0924x + 0,6183$ $R^2 = 0,8645$	Septiembre $y = -0,4076x - 0,1756$ $R^2 = 0,9146$	Septiembre $y = 3,436x - 3,6081$ $R^2 = 0,6202$
Octubre	Octubre $y = -0,0614x + 0,3019$ $R^2 = 0,7835$	Octubre $y = -0,4712x - 1,0641$ $R^2 = 0,9159$	Octubre $y = 5,5084x - 0,6737$ $R^2 = 0,8296$
Febrero	Febrero $y = -0,0235x + 0,5253$ $R^2 = 0,5298$	Febrero $y = -0,1012x - 0,5141$ $R^2 = 0,6923$	Febrero $y = 0,7873x - 1,0457$ $R^2 = 0,5078$
Marzo	Marzo $y = -0,13x + 0,2667$ $R^2 = 0,9119$	Marzo $y = -1,1343x - 1,2498$ $R^2 = 0,9997$	Marzo $y = 14,943x + 1,0217$ $R^2 = 0,9267$
Abril	Abril $y = -0,075x + 0,1717$ $R^2 = 0,9643$	Abril $y = -0,8959x - 1,6865$ $R^2 = 0,997$	Abril $y = 13,889x + 3,2407$ $R^2 = 0,9231$

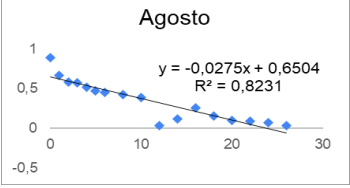
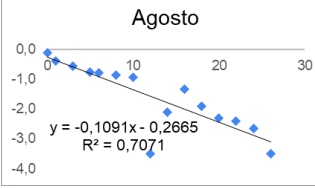
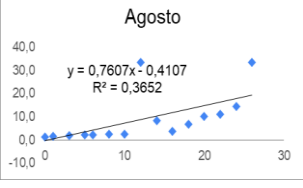
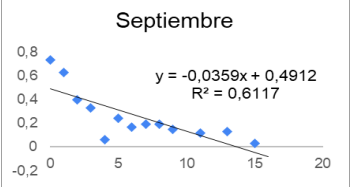
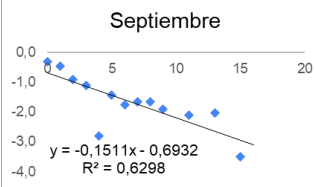
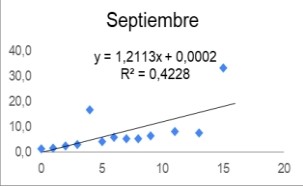
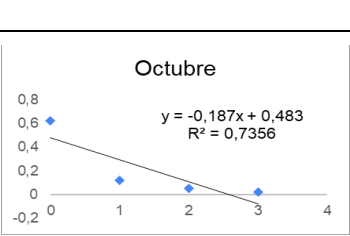
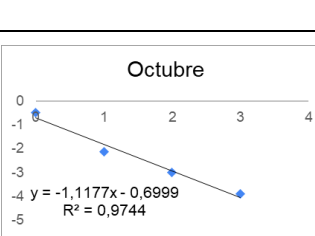
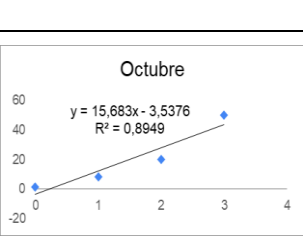
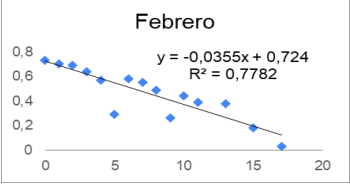
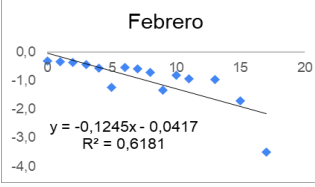
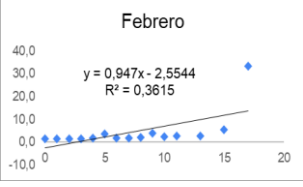
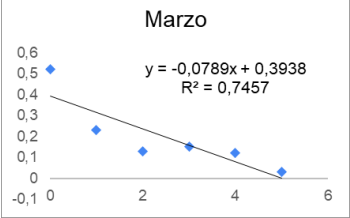
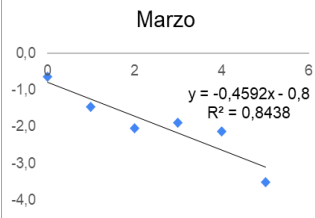
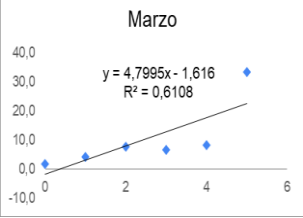
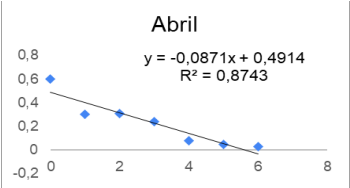
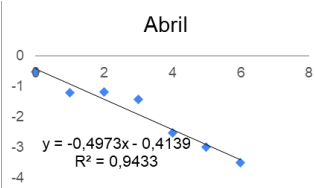
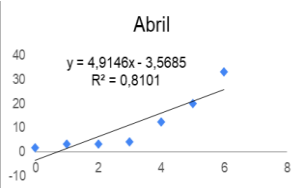
PUNTO 4. Camino a PTAP de Tutupali Chico			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0249x + 0,329$ $R^2 = 0,5626$	Agosto $y = -0,1917x - 1,0378$ $R^2 = 0,8824$	Agosto $y = 2,937x - 3,4006$ $R^2 = 0,8222$
Septiembre	Septiembre $y = -0,0246x + 0,6749$ $R^2 = 0,8063$	Septiembre $y = -0,0851x - 0,1737$ $R^2 = 0,7807$	Septiembre $y = 0,6856x - 2,7004$ $R^2 = 0,3214$
Octubre	Octubre $y = -0,0155x + 0,3748$ $R^2 = 0,6127$	Octubre $y = -0,0882x - 0,8945$ $R^2 = 0,7872$	Octubre $y = 0,7941x + 0,0854$ $R^2 = 0,6509$
Febrero	Febrero $y = -0,023x + 0,5037$ $R^2 = 0,582$	Febrero $y = -0,1031x - 0,5207$ $R^2 = 0,6771$	Febrero $y = 0,7191x - 0,691$ $R^2 = 0,5892$
Marzo	Marzo $y = -0,011x + 0,069$ $R^2 = 0,6914$	Marzo $y = -0,236x - 2,6398$ $R^2 = 0,6833$	Marzo $y = 5,381x + 13$ $R^2 = 0,6673$
Abril	Abril $y = -0,118x + 0,357$ $R^2 = 0,9643$	Abril $y = -0,8636x - 0,8181$ $R^2 = 0,9724$	Abril $y = 10,023x - 1,8581$ $R^2 = 0,8404$

PUNTO 5. Barrio Rosas			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	 Agosto $y = -0,0998x + 0,5767$ $R^2 = 0,6614$	 Agosto $y = -0,4655x - 0,5122$ $R^2 = 0,909$	 Agosto $y = 4,3887x - 1,6948$ $R^2 = 0,8967$
Septiembre	 Septiembre $y = -0,037x + 0,5422$ $R^2 = 0,6755$	 Septiembre $y = -0,1642x - 0,4802$ $R^2 = 0,9164$	 Septiembre $y = 1,316x - 1,8079$ $R^2 = 0,7724$
Octubre	 Octubre $y = -0,0194x + 0,5983$ $R^2 = 0,7468$	 Octubre $y = -0,0786x - 0,3262$ $R^2 = 0,7959$	 Octubre $y = 0,511x - 0,8677$ $R^2 = 0,6297$
Febrero	 Febrero $y = -0,0715x + 0,5117$ $R^2 = 0,8396$	 Febrero $y = -0,3784x - 0,3602$ $R^2 = 0,8538$	 Febrero $y = 3,4534x - 3,2781$ $R^2 = 0,6317$
Marzo	 Marzo $y = -0,0433x + 0,422$ $R^2 = 0,8752$	 Marzo $y = -0,2307x - 0,6594$ $R^2 = 0,861$	 Marzo $y = 1,7943x - 0,7961$ $R^2 = 0,6275$
Abril	 Abril $y = -0,07x + 0,1767$ $R^2 = 0,9018$	 Abril $y = -0,6675x - 1,7266$ $R^2 = 0,9716$	 Abril $y = 7,3684x + 5,2193$ $R^2 = 0,9999$

PUNTO 6. Barrio Hera			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	 Agosto $y = -0,0509x + 0,2438$ $R^2 = 0,9443$	 Agosto $y = -0,6189x - 1,0513$ $R^2 = 0,9292$	 Agosto $y = 15,616x - 12,886$ $R^2 = 0,6235$
Septiembre	 Septiembre $y = -0,0974x + 0,5783$ $R^2 = 0,8581$	 Septiembre $y = -0,5806x - 0,1288$ $R^2 = 0,9585$	 Septiembre $y = 10,207x - 14,441$ $R^2 = 0,5755$
Octubre	 Octubre $y = -0,12x + 0,5133$ $R^2 = 0,6446$	 Octubre $y = -0,595x - 0,6369$ $R^2 = 0,9517$	 Octubre $y = 5,9755x - 1,9577$ $R^2 = 0,8911$
Febrero	 Febrero $y = -0,0733x + 0,5242$ $R^2 = 0,603$	 Febrero $y = -0,3894x - 0,4065$ $R^2 = 0,7457$	 Febrero $y = 3,575x - 2,7109$ $R^2 = 0,6695$
Marzo	 Marzo $y = -0,025x + 0,085$ $R^2 = 0,8929$	 Marzo $y = -0,4055x - 2,4687$ $R^2 = 0,9369$	 Marzo $y = 6,9444x + 11,759$ $R^2 = 0,9745$
Abril	 Abril $y = -0,069x + 0,236$ $R^2 = 0,9726$	 Abril $y = -0,6009x - 1,3263$ $R^2 = 0,9853$	 Abril $y = 6,7444x + 1,5778$ $R^2 = 0,8685$

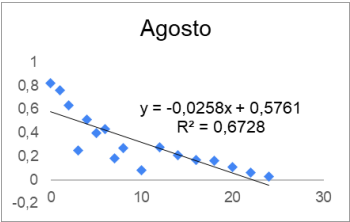
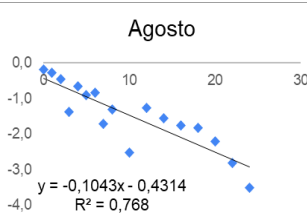
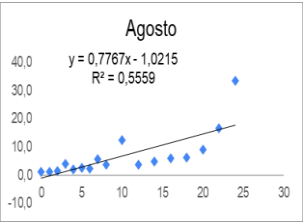
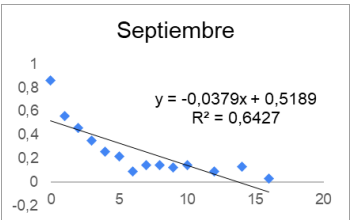
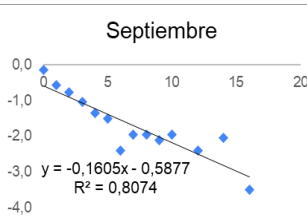
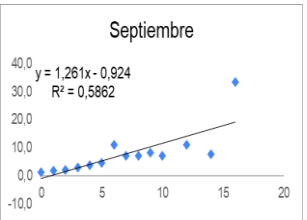
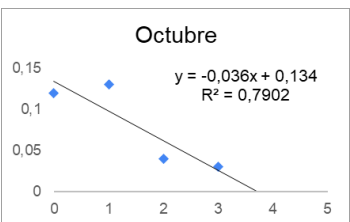
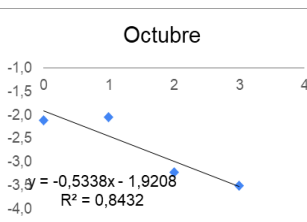
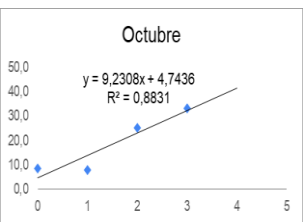
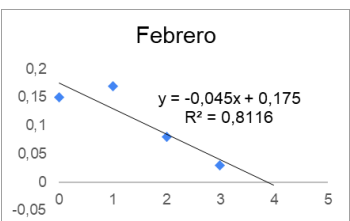
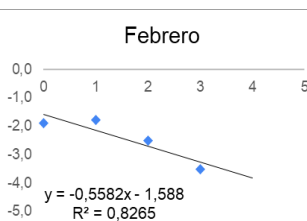
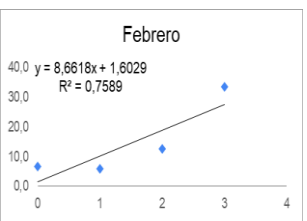
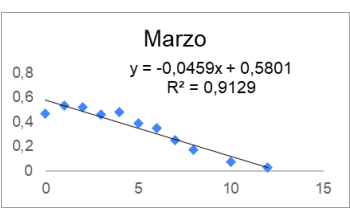
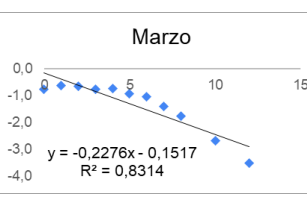
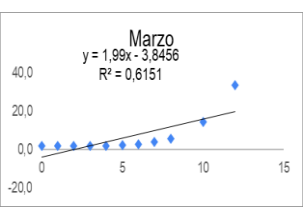
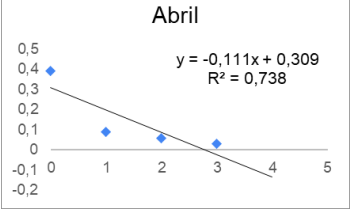
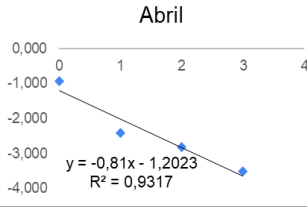
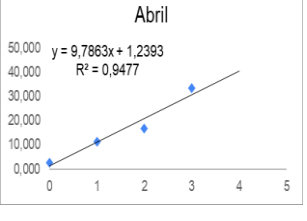
PUNTO 7. Entrada Vía a Machay			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	 Agosto $y = -0,125x + 0,446$ $R^2 = 0,8108$	 Agosto $y = -0,7322x - 0,713$ $R^2 = 0,9484$	 Agosto $y = 7,5993x - 1,2371$ $R^2 = 0,9089$
Septiembre	 Septiembre $y = -0,0735x + 0,6455$ $R^2 = 0,7647$	 Septiembre $y = -0,3004x - 0,276$ $R^2 = 0,838$	 Septiembre $y = 2,3313x - 2,0748$ $R^2 = 0,6537$
Octubre	 Octubre $y = -0,0424x + 0,5221$ $R^2 = 0,6438$	 Octubre $y = -0,1777x - 0,6449$ $R^2 = 0,8053$	 Octubre $y = 1,3215x - 0,1639$ $R^2 = 0,5882$
Febrero	 Febrero $y = -0,16x + 0,694$ $R^2 = 0,8088$	 Febrero $y = -0,6414x - 0,0681$ $R^2 = 0,8538$	 Febrero $y = 4,1725x - 1,8543$ $R^2 = 0,7083$
Marzo	 Marzo $y = -0,0602x + 0,4583$ $R^2 = 0,8681$	 Marzo $y = -0,3177x - 0,5404$ $R^2 = 0,7789$	 Marzo $y = 2,9734x - 2,3618$ $R^2 = 0,4914$
Abril	 Abril $y = -0,055x + 0,1483$ $R^2 = 0,9973$	 Abril $y = -0,6609x - 1,8471$ $R^2 = 0,9831$	 Abril $y = 9,1667x + 5,0926$ $R^2 = 0,9187$

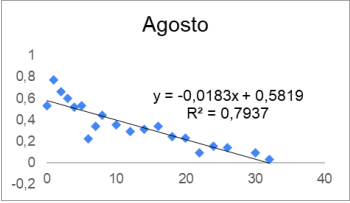
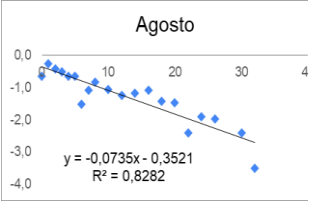
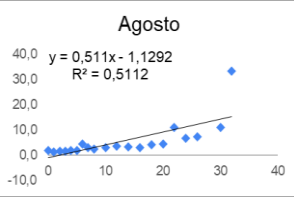
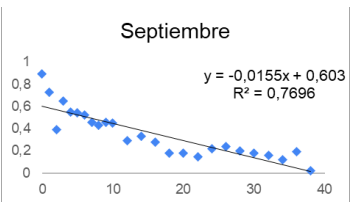
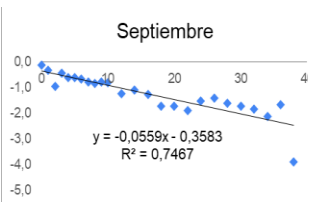
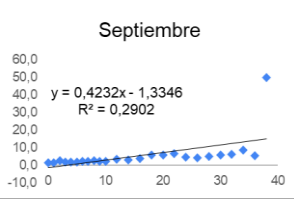
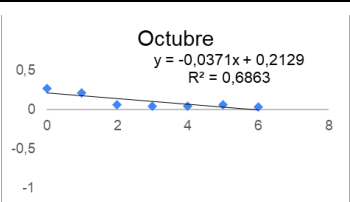
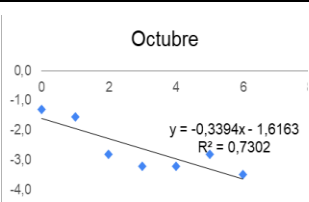
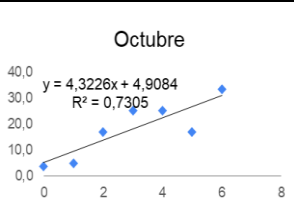
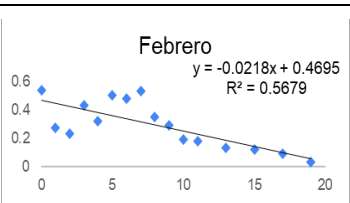
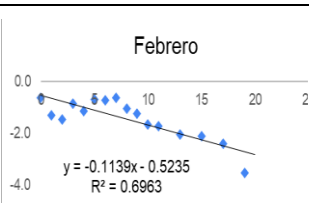
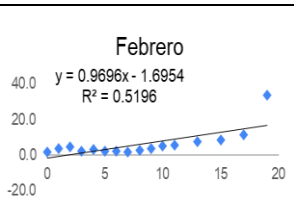
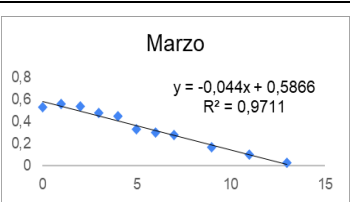
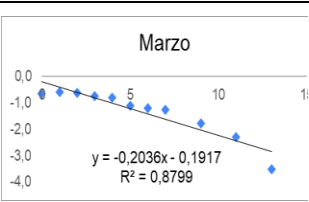
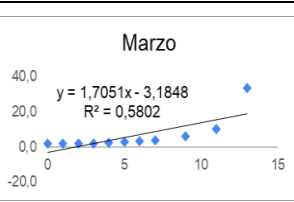
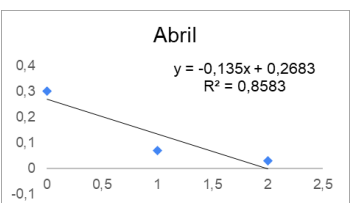
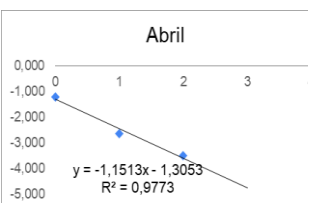
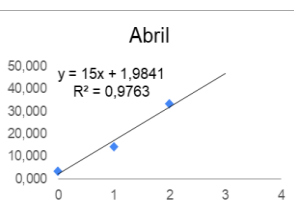
PUNTO 8. Cancha Gool Garden			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	 Agosto $y = -0,0173x + 0,5364$ $R^2 = 0,8257$	 Agosto $y = -0,0685x - 0,4819$ $R^2 = 0,8041$	 Agosto $y = 0,468x - 0,5284$ $R^2 = 0,389$
Septiembre	 Septiembre $y = -0,0264x + 0,5122$ $R^2 = 0,6955$	 Septiembre $y = -0,1138x - 0,5008$ $R^2 = 0,8598$	 Septiembre $y = 0,8839x - 1,3709$ $R^2 = 0,514$
Octubre	 Octubre $y = -0,0107x + 0,3361$ $R^2 = 0,4692$	 Octubre $y = -0,0574x - 1,029$ $R^2 = 0,5714$	 Octubre $y = 0,4128x + 1,7964$ $R^2 = 0,4757$
Febrero	 Febrero $y = -0,0146x + 0,5413$ $R^2 = 0,5633$	 Febrero $y = -0,0558x - 0,5246$ $R^2 = 0,6172$	 Febrero $y = 0,3232x + 0,4422$ $R^2 = 0,4499$
Marzo	 Marzo $y = -0,0232x + 0,4874$ $R^2 = 0,8454$	 Marzo $y = -0,1183x - 0,4788$ $R^2 = 0,879$	 Marzo $y = 0,976x - 1,6697$ $R^2 = 0,6406$
Abril	 Abril $y = -0,029x + 0,121$ $R^2 = 0,9836$	 Abril $y = -0,441x - 2,012$ $R^2 = 0,9082$	 Abril $y = 7,8175x + 5,0397$ $R^2 = 0,7963$

PUNTO 9. Hacienda Sigüenza			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto  $y = -0,0275x + 0,6504$ $R^2 = 0,8231$	Agosto  $y = -0,1091x - 0,2665$ $R^2 = 0,7071$	Agosto  $y = 0,7607x - 0,4107$ $R^2 = 0,3652$
Septiembre	Septiembre  $y = -0,0359x + 0,4912$ $R^2 = 0,6117$	Septiembre  $y = -0,1511x - 0,6932$ $R^2 = 0,6298$	Septiembre  $y = 1,2113x + 0,0002$ $R^2 = 0,4228$
Octubre	Octubre  $y = -0,187x + 0,483$ $R^2 = 0,7356$	Octubre  $y = -1,1177x - 0,6999$ $R^2 = 0,9744$	Octubre  $y = 15,683x - 3,5376$ $R^2 = 0,8949$
Febrero	Febrero  $y = -0,0355x + 0,724$ $R^2 = 0,7782$	Febrero  $y = -0,1245x - 0,0417$ $R^2 = 0,6181$	Febrero  $y = 0,947x - 2,5544$ $R^2 = 0,3615$
Marzo	Marzo  $y = -0,0789x + 0,3938$ $R^2 = 0,7457$	Marzo  $y = -0,4592x - 0,8$ $R^2 = 0,8438$	Marzo  $y = 4,7995x - 1,616$ $R^2 = 0,6108$
Abril	Abril  $y = -0,0871x + 0,4914$ $R^2 = 0,8743$	Abril  $y = -0,4973x - 0,4139$ $R^2 = 0,9433$	Abril  $y = 4,9146x - 3,5685$ $R^2 = 0,8101$

PUNTO 10. Capulispamba			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0173x + 0,6006$ $R^2 = 0,587$	Agosto $y = -0,0622x - 0,456$ $R^2 = 0,6196$	Agosto $y = 0,4137x - 0,1611$ $R^2 = 0,4242$
Septiembre	Septiembre $y = -0,045x + 0,4964$ $R^2 = 0,6137$	Septiembre $y = -0,2528x - 0,5013$ $R^2 = 0,877$	Septiembre $y = 4,32x - 11,032$ $R^2 = 0,5038$
Octubre	Octubre $y = -0,325x + 0,605$ $R^2 = 0,8622$	Octubre $y = -1,5604x - 0,417$ $R^2 = 0,9988$	Octubre $y = 15,931x - 1,766$ $R^2 = 0,8898$
Febrero	Febrero $y = -0,0206x + 0,623$ $R^2 = 0,607$	Febrero $y = -0,0741x - 0,3203$ $R^2 = 0,6181$	Febrero $y = 0,5263x - 1,1089$ $R^2 = 0,3835$
Marzo	Marzo $y = -0,101x + 0,284$ $R^2 = 0,7766$	Marzo $y = -0,8063x - 1,2542$ $R^2 = 0,9574$	Marzo $y = 10,143x + 1,3333$ $R^2 = 0,9817$
Abril	Abril $y = -0,089x + 0,378$ $R^2 = 0,9828$	Abril $y = -0,6041x - 0,7092$ $R^2 = 0,9051$	Abril $y = 6,6911x - 2,6282$ $R^2 = 0,6768$

PUNTO 11. Barrio Acchayacu			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0208x + 0,6822$ $R^2 = 0,6754$	Agosto $y = -0,0708x - 0,2292$ $R^2 = 0,7189$	Agosto $y = 0,4602x - 1,1283$ $R^2 = 0,4402$
Septiembre	Septiembre $y = -0,0302x + 0,4742$ $R^2 = 0,5326$	Septiembre $y = -0,1621x - 0,5639$ $R^2 = 0,7441$	Septiembre $y = 2,7921x - 9,0024$ $R^2 = 0,3913$
Octubre	Octubre $y = -0,325x + 0,6117$ $R^2 = 0,8829$	Octubre $y = -1,5604x - 0,3693$ $R^2 = 0,9997$	Octubre $y = 15,931x - 2,1078$ $R^2 = 0,8685$
Febrero	Febrero $y = -0,0203x + 0,5705$ $R^2 = 0,5325$	Febrero $y = -0,0877x - 0,3636$ $R^2 = 0,5508$	Febrero $y = 0,6785x - 1,3106$ $R^2 = 0,3887$
Marzo	Marzo $y = -0,0277x + 0,4931$ $R^2 = 0,922$	Marzo $y = -0,135x - 0,4373$ $R^2 = 0,8422$	Marzo $y = 1,1233x - 2,208$ $R^2 = 0,5217$
Abril	Abril $y = -0,15x + 0,2967$ $R^2 = 0,871$	Abril $y = -1,1989x - 1,1814$ $R^2 = 0,9891$	Abril $y = 15,152x + 1,1364$ $R^2 = 0,9552$

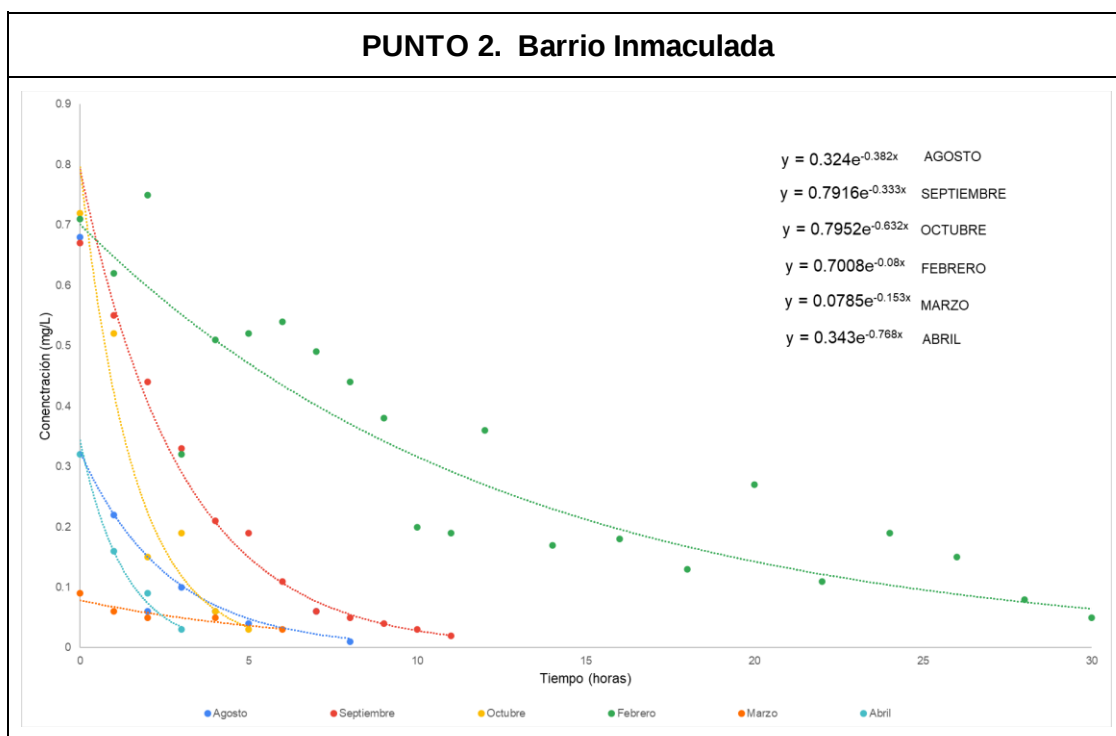
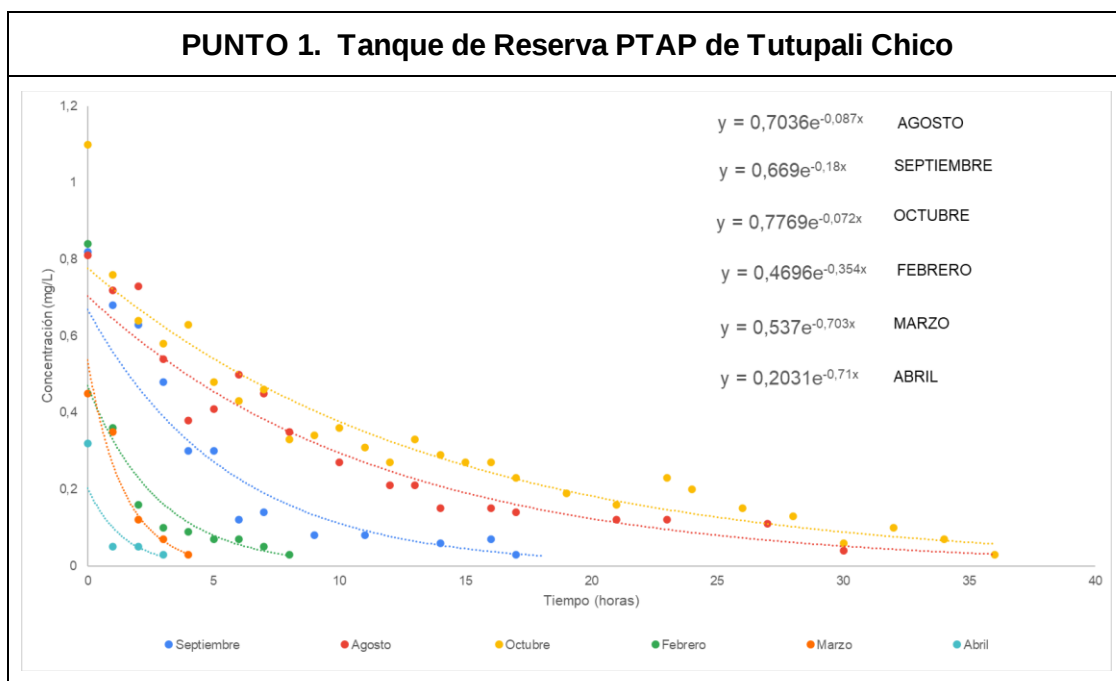
PUNTO 12. Estadio de Tutupali Chico			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	 Agosto $y = -0,0258x + 0,5761$ $R^2 = 0,6728$	 Agosto $y = -0,1043x - 0,4314$ $R^2 = 0,768$	 Agosto $y = 0,7767x - 1,0215$ $R^2 = 0,5559$
Septiembre	 Septiembre $y = -0,0379x + 0,5189$ $R^2 = 0,6427$	 Septiembre $y = -0,1605x - 0,5877$ $R^2 = 0,8074$	 Septiembre $y = 1,261x - 0,924$ $R^2 = 0,5862$
Octubre	 Octubre $y = -0,036x + 0,134$ $R^2 = 0,7902$	 Octubre $y = -0,5338x - 1,9208$ $R^2 = 0,8432$	 Octubre $y = 9,2308x + 4,7436$ $R^2 = 0,8831$
Febrero	 Febrero $y = -0,045x + 0,175$ $R^2 = 0,8116$	 Febrero $y = -0,5582x - 1,588$ $R^2 = 0,8265$	 Febrero $y = 8,6618x + 1,6029$ $R^2 = 0,7589$
Marzo	 Marzo $y = -0,0459x + 0,5801$ $R^2 = 0,9129$	 Marzo $y = -0,2276x - 0,1517$ $R^2 = 0,8314$	 Marzo $y = 1,99x - 3,8456$ $R^2 = 0,6151$
Abril	 Abril $y = -0,111x + 0,309$ $R^2 = 0,738$	 Abril $y = -0,81x - 1,2023$ $R^2 = 0,9317$	 Abril $y = 9,7863x + 1,2393$ $R^2 = 0,9477$

PUNTO 13. Escuela "Francisco Moscoso"			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	 Agosto $y = -0,0183x + 0,5819$ $R^2 = 0,7937$	 Agosto $y = -0,0735x - 0,3521$ $R^2 = 0,8282$	 Agosto $y = 0,511x - 1,1292$ $R^2 = 0,5112$
Septiembre	 Septiembre $y = -0,0155x + 0,603$ $R^2 = 0,7696$	 Septiembre $y = -0,0559x - 0,3583$ $R^2 = 0,7467$	 Septiembre $y = 0,4232x - 1,3346$ $R^2 = 0,2902$
Octubre	 Octubre $y = -0,0371x + 0,2129$ $R^2 = 0,6863$	 Octubre $y = -0,3394x - 1,6163$ $R^2 = 0,7302$	 Octubre $y = 4,3226x + 4,9084$ $R^2 = 0,7305$
Febrero	 Febrero $y = -0,0218x + 0,4695$ $R^2 = 0,5679$	 Febrero $y = -0,1139x - 0,5235$ $R^2 = 0,6963$	 Febrero $y = 0,9696x - 1,6954$ $R^2 = 0,5196$
Marzo	 Marzo $y = -0,044x + 0,5866$ $R^2 = 0,9711$	 Marzo $y = -0,2036x - 0,1917$ $R^2 = 0,8799$	 Marzo $y = 1,7051x - 3,1848$ $R^2 = 0,5802$
Abril	 Abril $y = -0,135x + 0,2683$ $R^2 = 0,8583$	 Abril $y = -1,1513x - 1,3053$ $R^2 = 0,9773$	 Abril $y = 15x + 1,9841$ $R^2 = 0,9763$

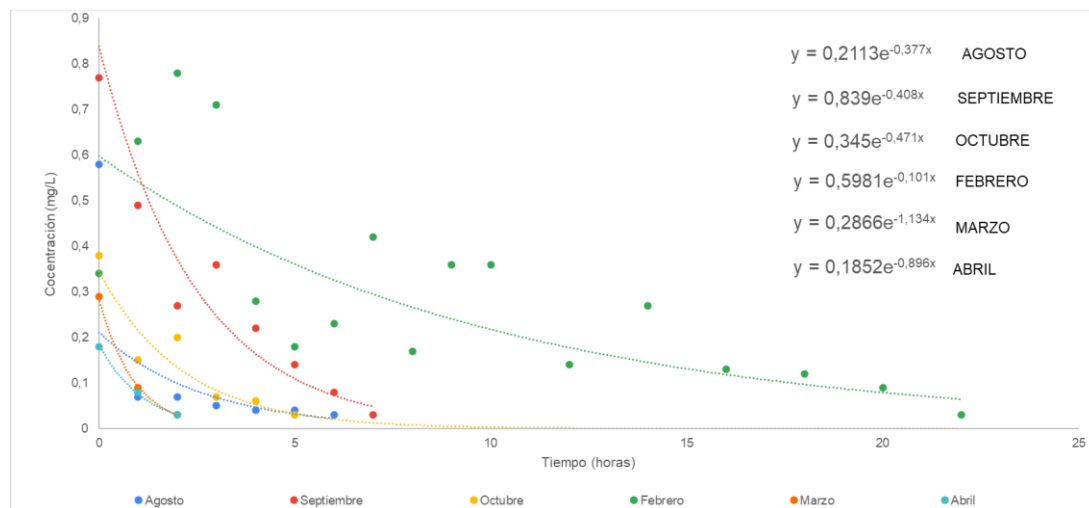
PUNTO 14. Hacienda San Andrés			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0177x + 0,5914$ $R^2 = 0,7166$	Agosto $y = -0,0646x - 0,3927$ $R^2 = 0,7396$	Agosto $y = 0,4429x - 0,7151$ $R^2 = 0,4012$
Septiembre	Septiembre $y = -0,0141x + 0,5551$ $R^2 = 0,8488$	Septiembre $y = -0,0555x - 0,4205$ $R^2 = 0,764$	Septiembre $y = 0,4419x - 1,3721$ $R^2 = 0,294$
Octubre	Octubre $y = -0,1x + 0,265$ $R^2 = 0,6748$	Octubre $y = -0,881x - 1,472$ $R^2 = 0,8598$	Octubre $y = 14,643x + 2,5$ $R^2 = 0,9411$
Febrero	Febrero $y = -0,0211x + 0,5067$ $R^2 = 0,6366$	Febrero $y = -0,0953x - 0,5424$ $R^2 = 0,821$	Febrero $y = 0,7008x - 0,8037$ $R^2 = 0,6079$
Marzo	Marzo $y = -0,0181x + 0,3706$ $R^2 = 0,8133$	Marzo $y = -0,1112x - 0,7602$ $R^2 = 0,8164$	Marzo $y = 0,9945x - 1,2333$ $R^2 = 0,5856$
Abril	Abril $y = -0,045x + 0,1217$ $R^2 = 0,9959$	Abril $y = -0,6931x - 2,0244$ $R^2 = 0,9457$	Abril $y = 12,5x + 5,5556$ $R^2 = 0,871$

PUNTO 15. Quinta Guillermina			
MES	ORDEN CERO Concentración/ Tiempo	PRIMER ORDEN Ln (C) / Tiempo	SEGUNDO ORDEN (1/C)/ Tiempo
Agosto	Agosto $y = -0,0581x + 0,2895$ $R^2 = 0,632$	Agosto $y = -0,4134x - 1,2804$ $R^2 = 0,7862$	Agosto $y = 4,8572x + 1,91$ $R^2 = 0,7135$
Septiembre	Septiembre $y = -0,0295x + 0,407$ $R^2 = 0,8056$	Septiembre $y = -0,1707x - 0,6895$ $R^2 = 0,9419$	Septiembre $y = 1,62x - 1,9917$ $R^2 = 0,7274$
Octubre	Octubre $y = -0,0682x + 0,3632$ $R^2 = 0,5294$	Octubre $y = -0,3929x - 1,1259$ $R^2 = 0,7931$	Octubre $y = 4,2817x + 0,7967$ $R^2 = 0,7911$
Febrero	Febrero $y = -0,0191x + 0,4865$ $R^2 = 0,7812$	Febrero $y = -0,0897x - 0,5118$ $R^2 = 0,7387$	Febrero $y = 0,7304x - 1,3556$ $R^2 = 0,4721$
Marzo	Marzo $y = -0,126x + 0,394$ $R^2 = 0,9529$	Marzo $y = -0,8748x - 0,6747$ $R^2 = 0,9303$	Marzo $y = 9,8879x - 2,5342$ $R^2 = 0,784$
Abril	Abril $y = -0,125x + 0,245$ $R^2 = 0,8096$	Abril $y = -1,1168x - 1,475$ $R^2 = 0,9106$	Abril $y = 14,881x + 4,0873$ $R^2 = 0,9964$

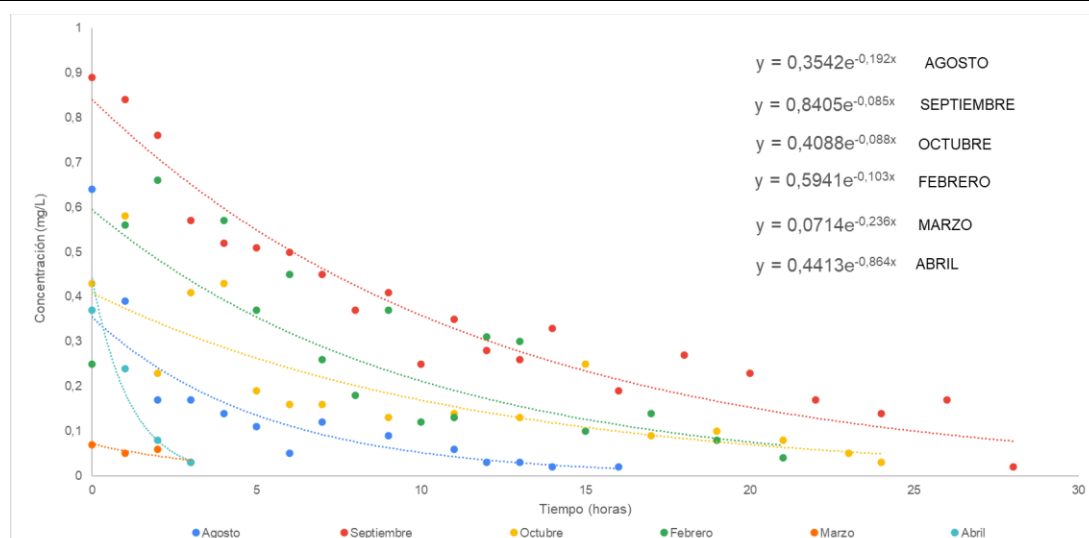
7.6 Anexo E. Curvas de decaimiento de cloro libre para la determinación de la constante kb

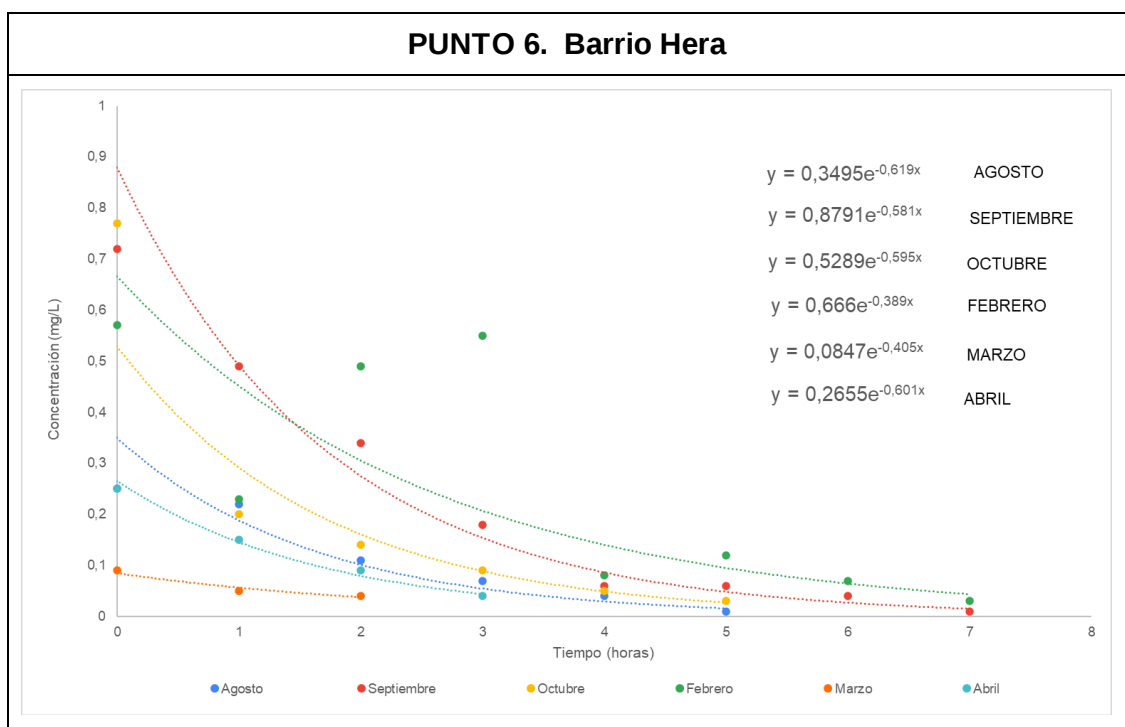
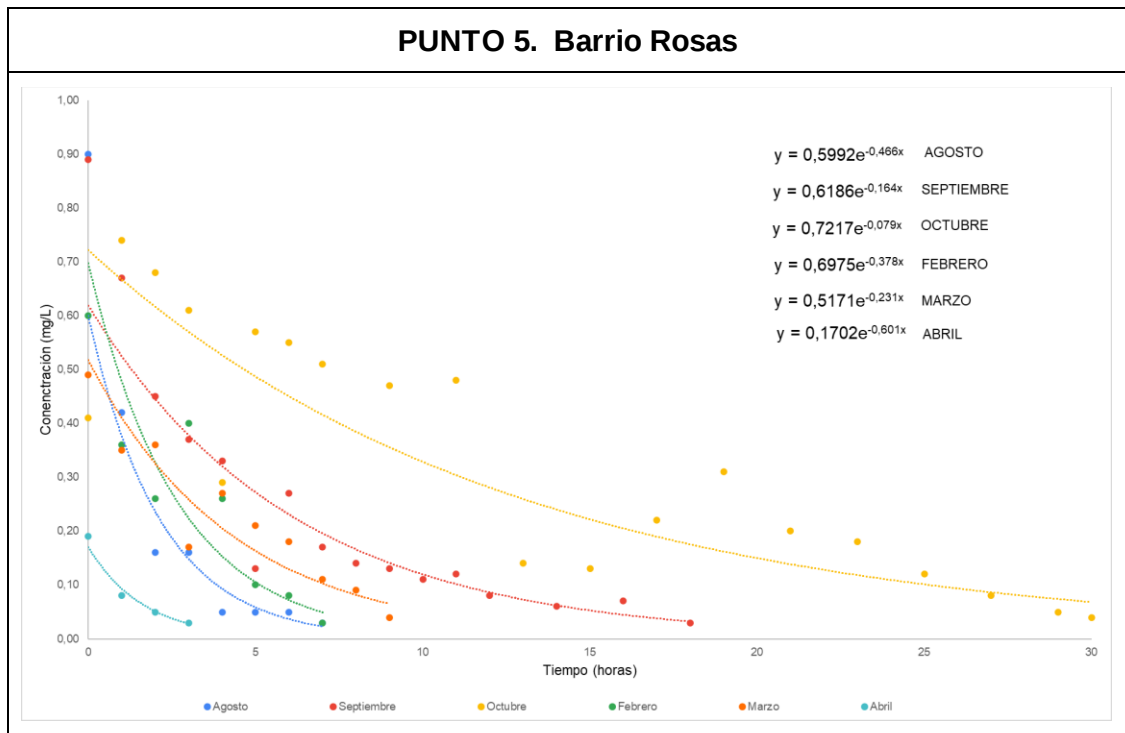


PUNTO 3. Barrio Cruz Loma

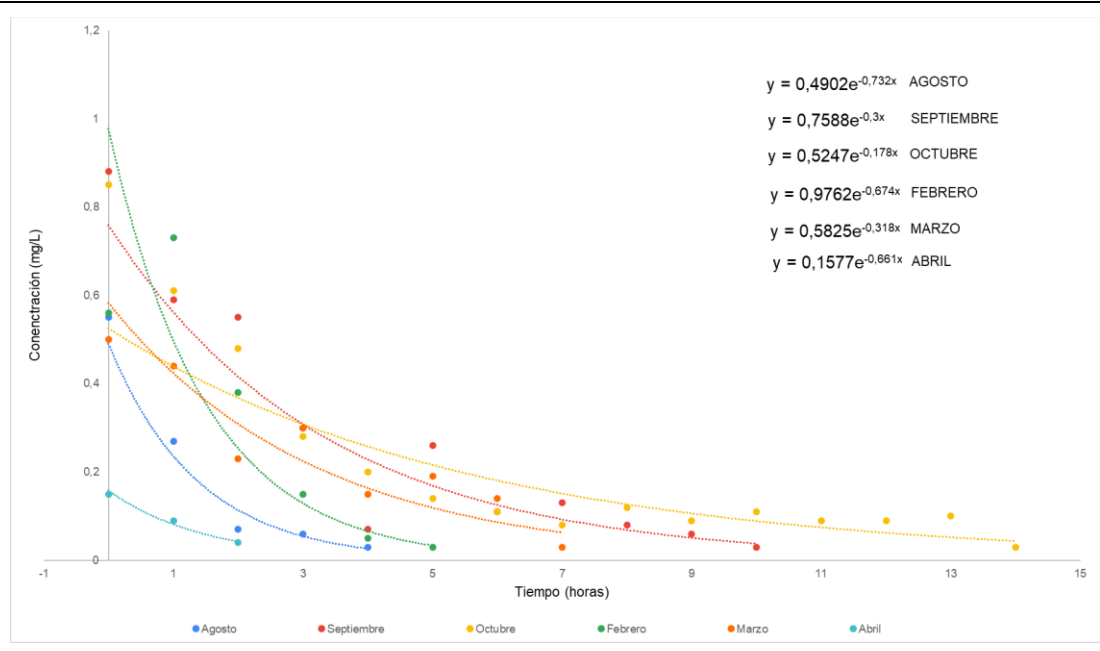


PUNTO 4. Camino a PTAP Tutupali Chico

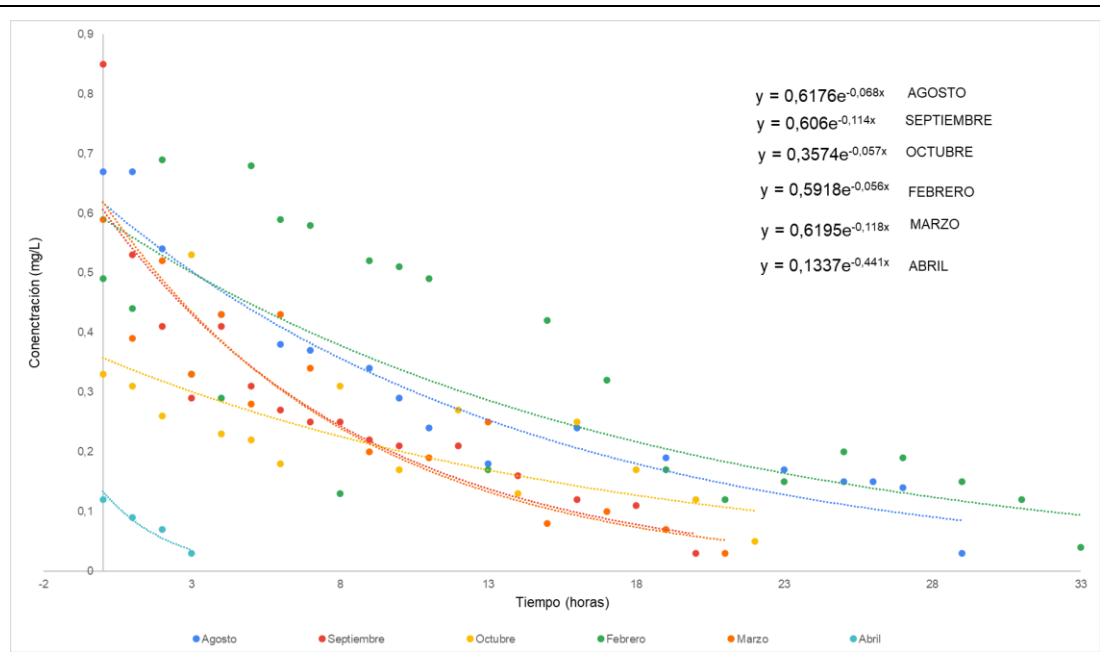


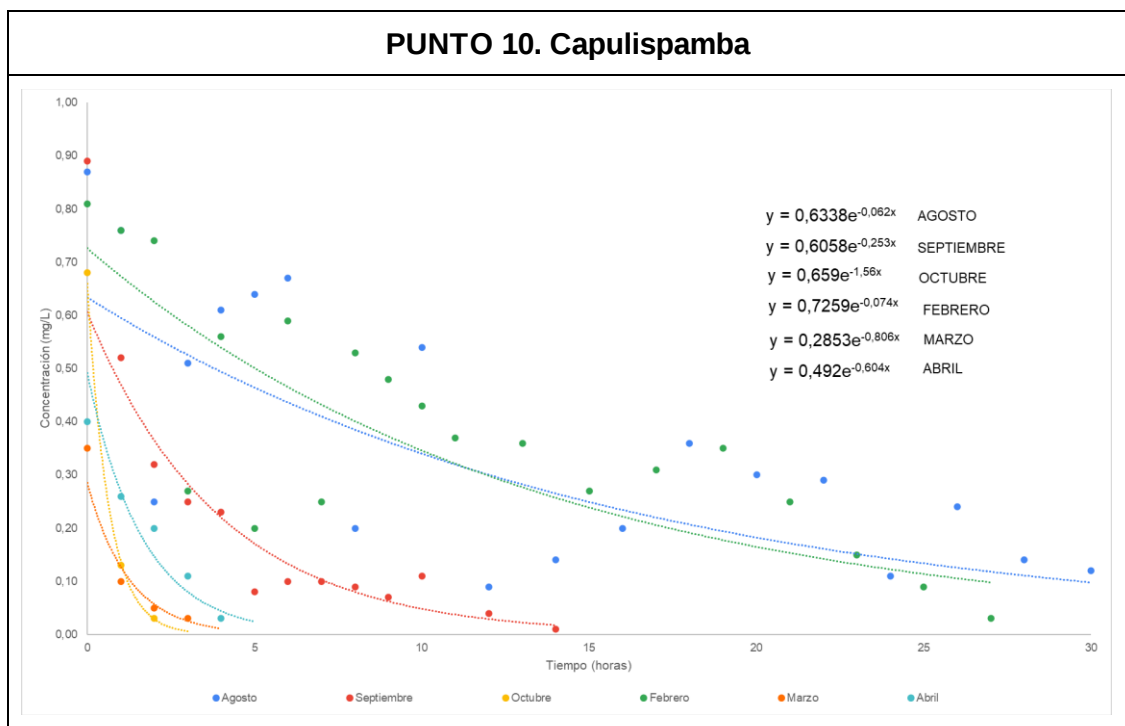
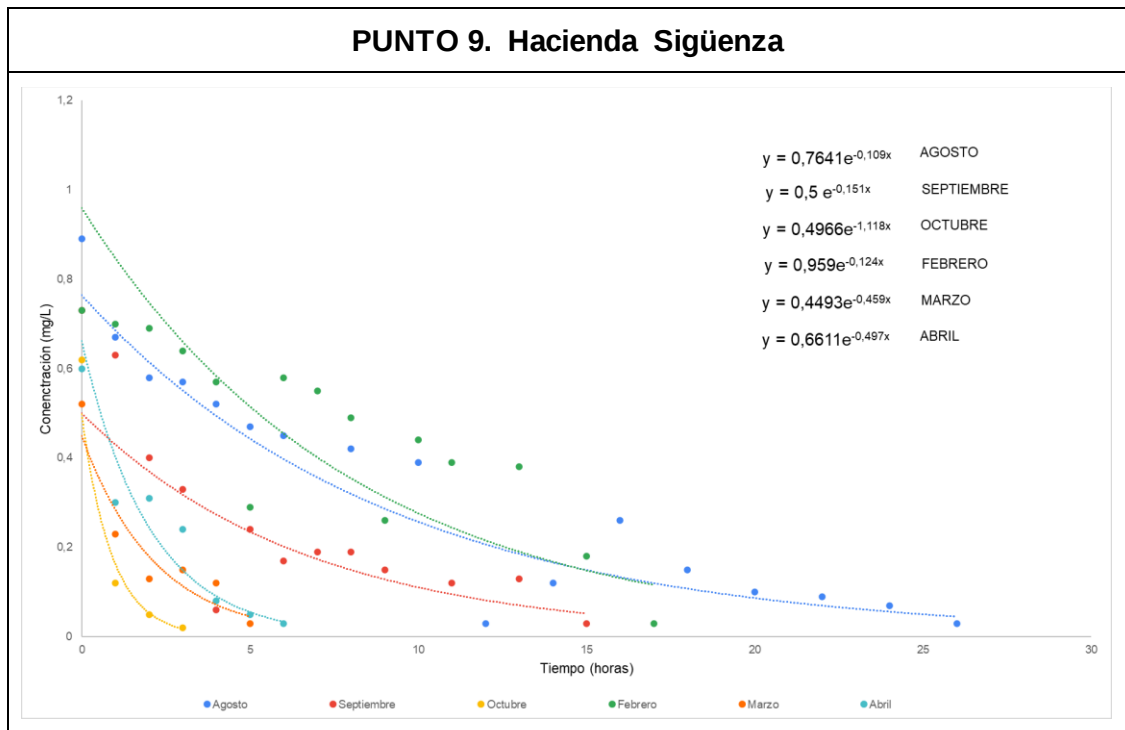


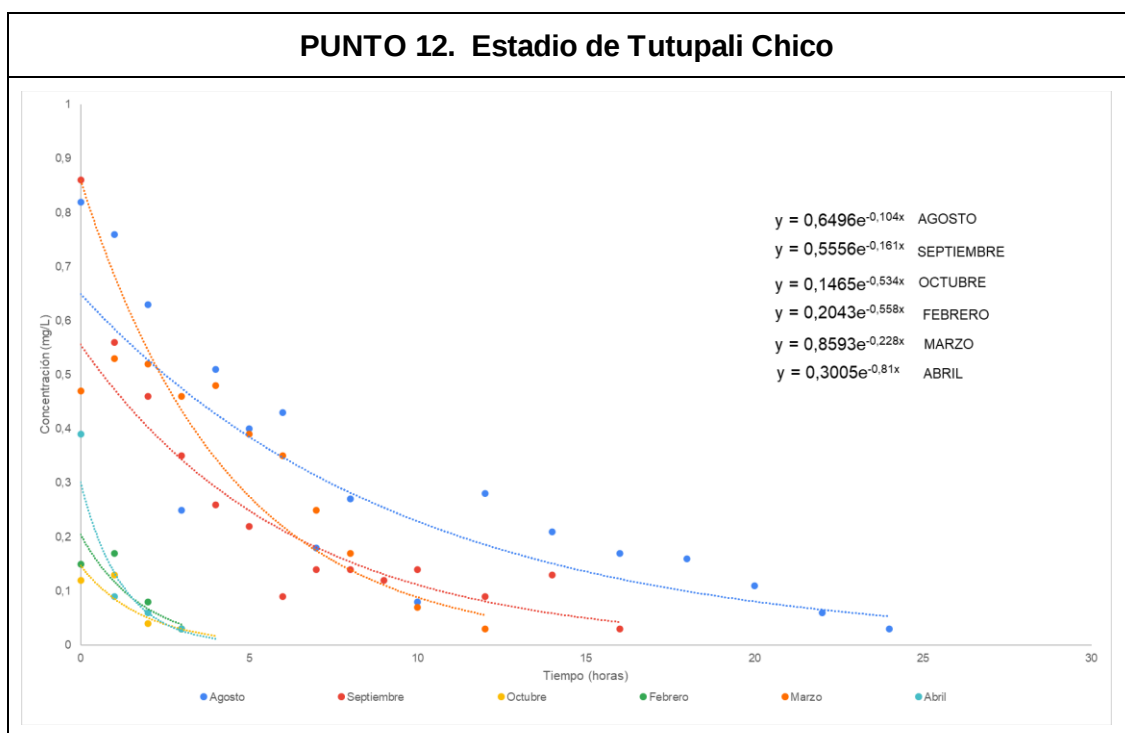
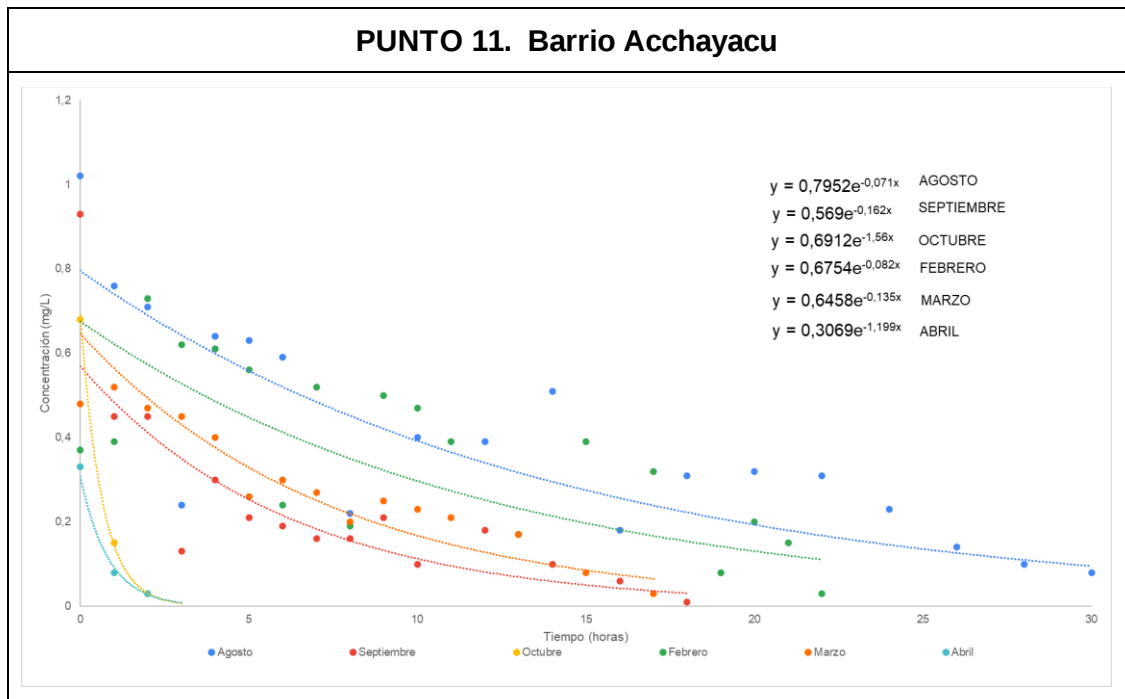
PUNTO 7. Entrada Vía a Machay



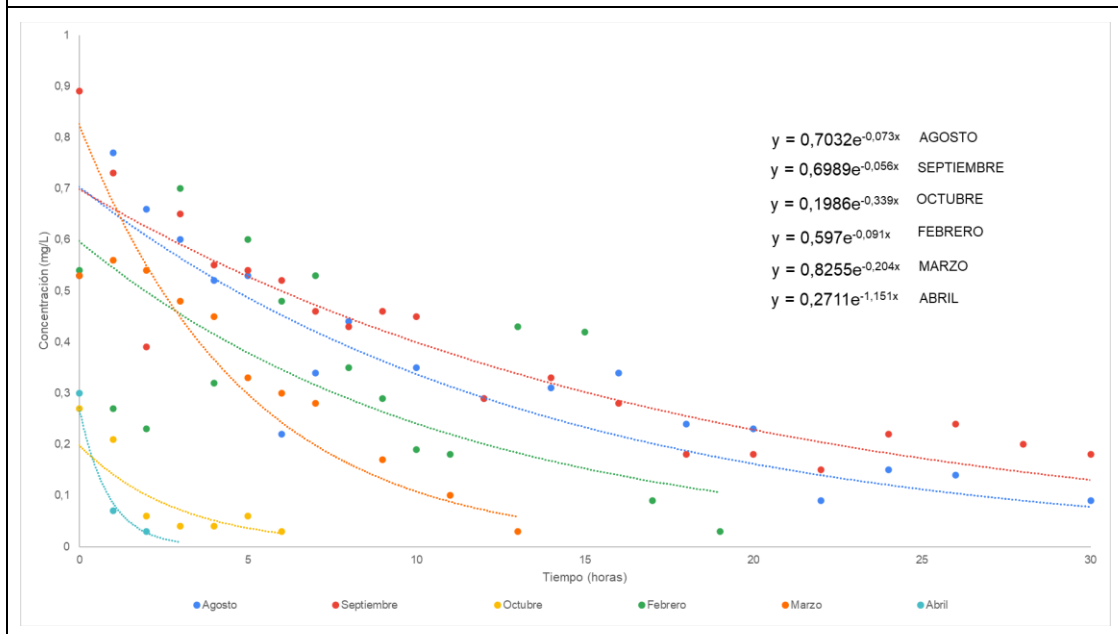
PUNTO 8. Canchas Gool Garden



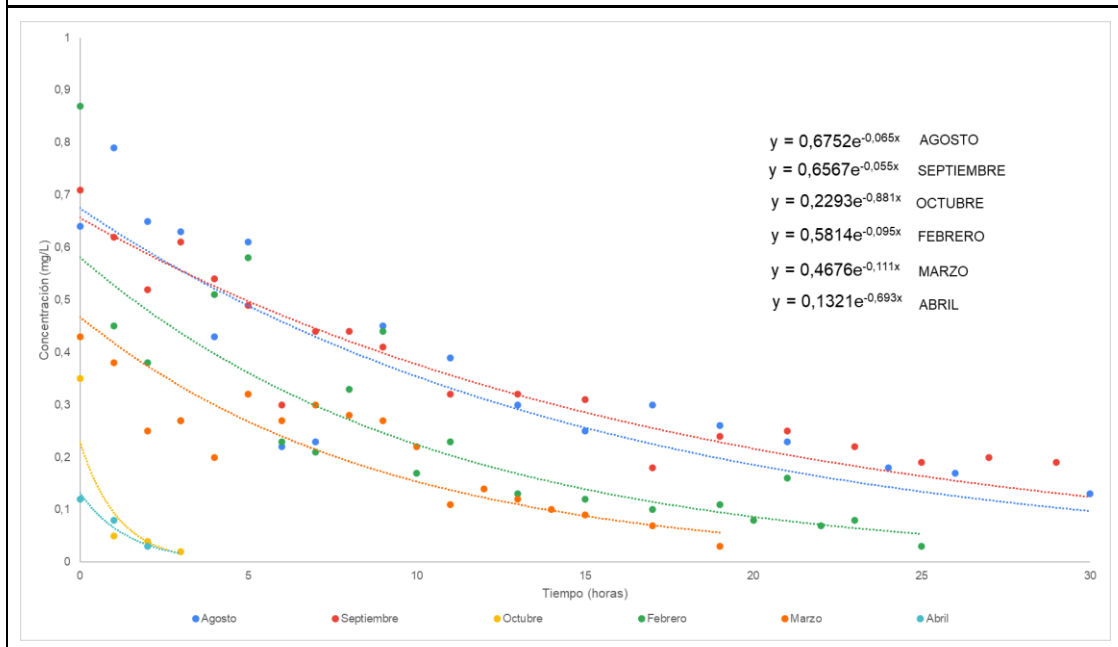


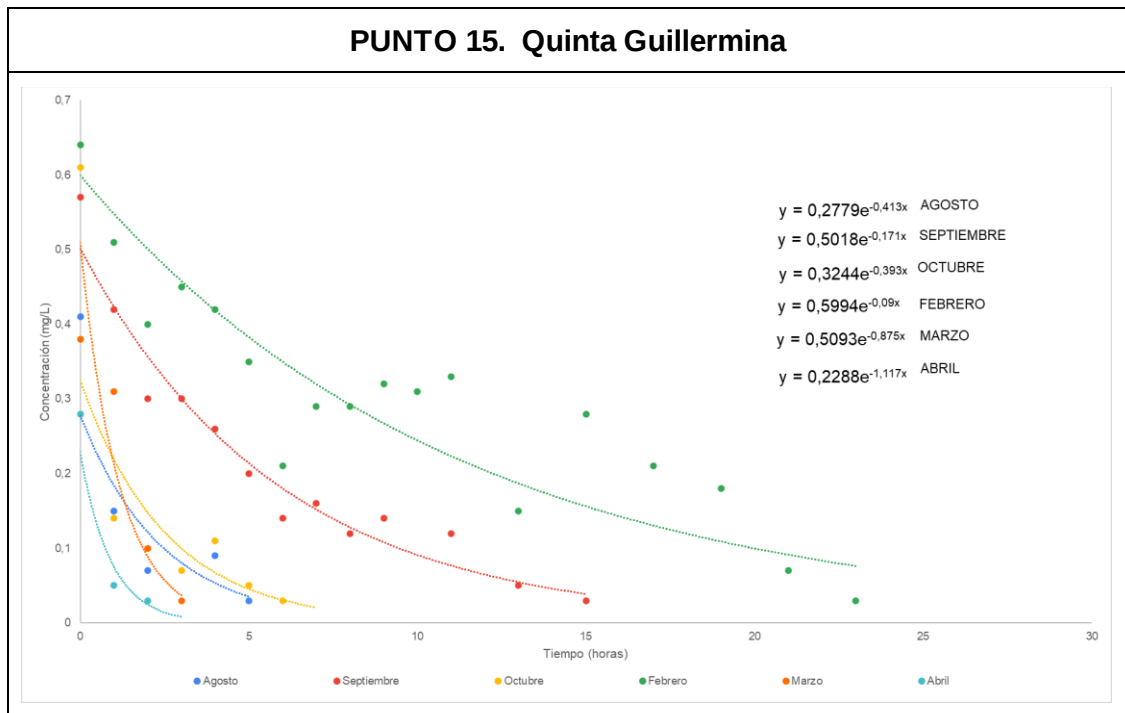


PUNTO 13. Escuela "Francisco Moscoso"



PUNTO 14. Hacienda San Andrés





7.7 Anexo F. Ensayos de laboratorio para determinar la dosis óptima de cloro

Envases utilizados en el ensayo de laboratorio para la determinación del punto de quiebre



Solución de Hipoclorito de calcio (1000 ppm)



Cantidad de cloro (Kg) utilizada en la preparación de la solución madre

