



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

PROPUESTA DEL USO DEL POTENCIAL ÓXIDO REDUCCIÓN PARA EL CONTROL DE
DESINFECCIÓN CON CLORO EN DOS PLANTAS POTABILIZADORAS DE RÍO
MAGDALENA

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA
INGRID ELIZABETH RUIZ VELÁZQUEZ

TUTORA PRINCIPAL
DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA, INSTITUTO DE INGENIERÍA – UNAM

COMITÉ TUTOR
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA – UNAM
DR. RAFAEL MAGAÑA LÓPEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA – UNAM
DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA, INSTITUTO DE INGENIERÍA – UNAM
DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA – UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 25 DE NOVIEMBRE DE 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

Secretario: DR. RAFAEL MAGAÑA LÓPEZ

1^{er}. Vocal: DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

2^{do}. Vocal: DRA. ANA ELISA SILVA RAMÍREZ

3^{er}. Vocal: DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA – UNAM.

TUTORA DE TESIS:

DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA



FIRMA

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1 Justificación	18
1.2 Hipótesis	22
1.2.1 Hipótesis Nula (H_0)	22
1.2.2 Hipótesis Alternativa (H_1).....	22
1.3 Objetivos.....	23
1.3.1 Objetivo general.....	23
1.3.2 Objetivos específicos	23
1.4 Alcances y limitaciones.....	23
1.5 Normatividad.....	24
2. MARCO DE REFERENCIA.....	26
2.1 Potencial Óxido Reducción	26
2.1.1 Descripción del parámetro.....	26
2.1.2 Uso del ORP en la inactivación o destrucción de virus y bacterias. 26	26
2.1.3 Uso del ORP como indicador del buen desempeño de desinfección del agua.....	27
2.2 Sistemas de desinfección.....	28
2.2.1 Mecanismo de funcionamiento químico	30
2.2.2 Generalidades de la cloración	30
2.2.3 Cloración al punto de quiebre	33
2.2.3.1 Reacciones ocurridas durante la desinfección empleando hipoclorito de sodio.....	35
Oxidación de la materia inorgánica.....	35
Oxidación de la materia orgánica.....	36
Reacción del cloro libre residual.....	37
2.3 Organismos indicadores en agua para consumo humano	37

2.3.1 Coliformes	38
2.3.2 E. coli	39
2.4 Cinéticas de desinfección	39
2.4.1 Ley de Chick	39
2.4.2 Watson-Chick	40
2.4.3 Ley de poder de Hom	40
2.4.4 El factor Ct como indicador de efectividad del desinfectante	41
2.5 Plantas Potabilizadoras (PP) en México	42
2.6 Caso de estudio Plantas Potabilizadoras (PP) Río Magdalena 1 y 2 ...	44
2.6.1 Generalidades del Río Magdalena	44
2.6.2 Generalidades sobre la PP Río Magdalena 1	47
2.6.2.1 Distribución de los procesos y operaciones unitarios (POU).....	48
2.6.2.2 Calidad histórica del Influyente y Efluente de la PPRM1	49
2.6.3 Generalidades sobre la PP Río Magdalena 2	53
2.6.3.1 Distribución de los procesos y operaciones unitarios (POU).....	53
2.7 Situación de agua potable con relación al SARS-CoV- 2, virus causante de la COVID-19	57
3. METODOLOGÍA	60
3.1 PRIMERA ETAPA. Toma de Muestras	62
3.1.1 Planta Potabilizadora Río Magdalena 1	63
3.1.1.1 Antes de Captación (AC)	64
3.1.1.2 Influyente Tanque Floculación (ITF)	65
3.1.1.3 Influyente Desinfección (ID)	66
3.1.1.4 Efluente Desinfección (ED).....	67
3.1.2 Planta Potabilizadora Río Magdalena 2	68
3.1.2.1 Captación Río (CR).....	68
3.1.2.2 Efluente Filtros Duales (EFD)	69
3.1.2.3 Efluente Cárcamo Desinfección (ECD).....	70
3.2 SEGUNDA ETAPA. Corridas Experimentales en Laboratorio	71
3.2.1 Parámetros de interés durante el monitoreo	71
3.2.2 Estándar de Referencia	74
3.2.2.1 Caracterización inicial	75

3.2.2.2 Prueba preliminar de desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras.....	76
3.2 TERCERA ETAPA. Desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras.....	81
3.2.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica preliminar	82
3.2.2 Corrida de desinfección en muestra tomada en PPRM1	82
3.2.3 Corrida de desinfección en muestra tomada en PPRM2	83
3.3 CUARTA ETAPA. Cinéticas de Desinfección y Recrecimiento.....	85
3.4 Tratamiento de datos mediante estadística.....	87
3.4.1 Análisis de Varianza (ANOVA)	87
3.4.1.1 Uso del estándar de referencia construido	88
3.4.1.2 Funcionamiento del sistema de desinfección en las PP.....	89
3.4.1.3 Efecto de la desinfección simulada sobre el agua del río Magdalena	89
3.4.2 Análisis de Superficie de Respuesta	90
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
4.2 Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica de los Sitios de Estudio.....	92
4.1.1 Muestreo compuesto en Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2	92
4.1.2 Muestreo en las operaciones y procesos unitarios de la Planta Potabilizadora Río Magdalena 1.....	97
4.1.3 Muestreo en las operaciones y procesos unitarios de la Planta Potabilizadora Río Magdalena 2	100
4.1.4 Muestreo para análisis microbiológicos en las operaciones y procesos unitarios de la Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2	103
4.3 Cloración al Punto de Quiebre.....	104
4.4 Desinfección.....	108
4.5 Interacción del ORP con algunos parámetros de interés.....	111
4.6 Cinéticas de Desinfección y Pruebas de Recrecimiento.....	113
4.6.1 Modelo de Chick	114
4.6.2 Modelo de Watson Chick	117
4.6.3 Recrecimiento bajo las condiciones favorables de desinfección	

4.6.4	Compilación de los estudios experimentales realizados	124
4.7	Tratamiento Estadístico	126
4.7.1	Análisis de Varianza con respecto a la propuesta del estándar de referencia	126
4.7.2	Análisis de Varianza con respecto a la evaluación de los sistemas de desinfección en cada PP	126
4.7.3	Análisis de Varianza con respecto a la desinfección simulada para PP1 y PP2	127
4.7.4	Análisis de Superficie de Respuesta para obtención de las mejores condiciones de desinfección.	129
5.	CONCLUSIONES	131
6.	REFERENCIAS	134
	ANEXOS	141
	A1. Relaciones entre los parámetros medidos y el Potencial Óxido Reducción	141
	A1.1 Análisis en muestreo Exploratorio Planta Potabilizadora Río Magdalena 1	141
	A1.2 Análisis en Planta Potabilizadora Río Magdalena1	144
	A1.3 Análisis en Planta Potabilizadora Río Magdalena 2	146
	A2. Detalle del ANOVA realizado	148
	A2.1 Calidad inicial entre PP1 y PP2, para poder emplear un estándar de referencia	148
	A2.2 Evaluación del funcionamiento de los sistemas de desinfección en cada PP	152
	A2.3 Evaluación de los resultados obtenidos en las desinfecciones simuladas de cada PP	155
	A3. Detalle de los resultados obtenidos en el análisis de Superficie de Respuesta	156
	A3.1 Superficie de Respuesta en PP1	156
	A3.2 Superficie de Respuesta en PP2	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Distribución del ácido hipocloroso y del hipoclorito en agua a diferentes valores de pH. Tomada de (CONAGUA, 2019) y adaptada de Tchobanoglous 2012.	32
Figura 2. 2. Curva obtenida en la cloración al punto de quiebre. Adaptado de (Aeas, 2012).	34
Figura 2. 3. Formas importantes de cloro en la cloración del agua. (Tomada (de Vargas, 2004).	35
Figura 2. 4. Ubicación geográfica de la cuenca del río Magdalena y las alcaldías que la comprenden dentro de la CDMX. Tomada de (Monsivais Montoliu, 2014)44	44
Figura 2. 5. Topografía de la microcuenca del río Magdalena. Tomado de (Monsivais Montoliu, 2014) y adaptado de (UNAM, et al., 2008)	45
Figura 2. 6. Etapas de desarrollo de Plan de Rescate. Tomado de (Monsivais Montoliu, 2014) y adaptado de (UNAM, et al., 2008).	47
Figura 2. 7. Diagrama de Flujo de Proceso de la PPRM1	49
Figura 2. 8. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 30 mg/L o unidades.	50
Figura 2. 9. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 140 mg/L o unidades	51
Figura 2. 10. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.12 mg/L o unidades.	52
Figura 2. 11. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.5 mg/L o unidades	52
Figura 2. 12. Diagrama de Flujo de Proceso de la PPRM2	54
Figura 2. 13. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 14 mg/L o unidades.	54
Figura 2. 14. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 120 mg/L o unidades.	55
Figura 2. 15. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.12 mg/L o unidades.	56
Figura 2. 16. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.5 mg/L o unidades	56
Figura 3. 1. Diagrama del desarrollo metodológico	61
Figura 3. 2. Mapa de puntos de muestreo para la Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2	63
Figura 3. 3. Sitio de la toma de muestra en AC	64
Figura 3. 4. Sitio de toma de muestra en ITF	66
Figura 3. 5. Sitio de la toma de muestra en ID.	67

Figura 3. 6. Sitio de la toma de muestra en ED	68
Figura 3. 7. Sitio de la toma de muestra en CR	69
Figura 3. 8. Sitio de la toma de muestra en EFD	70
Figura 3. 9. Sitio de la toma de muestra en ECD	71
Figura 3. 10. Laboratorio improvisado dentro de las instalaciones de la Planta Potabilizadora Río Magdalena 1 para la medición de parámetros de campo	74
Figura 3. 11. Muestra compuesta, cuyo volumen corresponde a 20 L de capacidad	75
Figura 3. 12. Medición de algunos parámetros al estándar de referencia para su caracterización inicial, previa a las pruebas de desinfección.....	76
Figura 3. 13. Preparación de la disolución de NaClO	79
Figura 3. 14. Adición de Cloro como NaClO al estándar de referencia.....	79
Figura 3. 15. Reacción del Cloro con el estándar de referencia durante el tiempo de contacto de 5 minutos.....	80
Figura 3. 16. Preparación de Na ₂ S ₂ O ₃ para añadir al estándar de referencia con cloro, al término del tiempo de reacción	80
Figura 3. 17. Medición de parámetros iniciales.....	81
Figura 3. 18. Toma de muestra puntual en AC-PPRM1 (a) y CR-PPRM2 (b).....	82
Figura 3. 19. Prueba de desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras para la PPRM1	83
Figura 3. 20. Sitio Prueba de desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras para la PPRM2	85

Figura 4. 1. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM 1y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 1.8 unidades	94
Figura 4. 2. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM 1y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 38 unidades	95
Figura 4. 3. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM 1y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 1783 unidades	96
Figura 4. 4. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM 1y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 0.35 unidades.....	97
Figura 4. 5. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM1 en parámetros cuyos valores ascienden a 18.2 unidades.....	98
Figura 4. 6. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM1 en parámetros cuyos valores ascienden a 895.5 unidades	99
Figura 4. 7. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM1 en parámetros cuyos valores ascienden a 13 unidades.....	100
Figura 4. 8. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM2 en parámetros cuyos valores ascienden a 16.7 unidades.....	101
Figura 4. 9. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM2 en parámetros cuyos valores ascienden a 840 unidades.....	102

Figura 4. 10. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM2 en parámetros cuyos valores ascienden a 36 unidades	103
Figura 4. 11. Calidad de agua microbiológica en procesos y operaciones unitarias de las PPRM 1 y 2.....	104
Figura 4. 12. Curva resultante de la cloración mediante el punto de quiebre, PPRM 1 y 2.....	105
Figura 4. 13. Valoración de la acidez y basicidad durante la cloración al punto de quiebre	106
Figura 4. 14. Valoración de la oxidación de la materia inorgánica durante la cloración al punto de quiebre	107
Figura 4. 15. Valoración de la oxidación de la materia orgánica durante la cloración al punto de quiebre	108
Figura 4. 16. Desinfección en Exploratorio PPRM1	109
Figura 4. 17. Desinfección en PPRM1.....	110
Figura 4. 18. Desinfección en PPRM2	111
Figura 4. 19. Correlación del ORP con respecto a la concentración de Cloro.....	112
Figura 4. 20. Correlación del ORP con respecto a Coliformes Totales.....	112
Figura 4. 21. Correlación del ORP con respecto a Coliformes fecales.....	113
Figura 4. 22. Tasa de supervivencia de organismos control, mediante el modelo de Chick en PP1.....	115
Figura 4. 23. Tasa de supervivencia de organismos control mediante el modelo de Chick, en PP2	117
Figura 4. 24. Tasa de supervivencia de organismos control mediante el modelo de Watson Chick, en PP1	119
Figura 4. 25. Tasa de supervivencia de organismos control mediante el modelo de Watson Chick, en PP2.....	121
Figura 4. 26. Recrecimiento de patógenos en PP1	123
Figura 4. 27. Recrecimiento de patógenos en PP2	124
Figura 4. 28. Superficies de respuesta obtenidas, para determinar las mejores condiciones en la desinfección de coliformes totales, y E. coli en PP1	129
Figura 4. 29. Superficies de respuesta obtenidas, para determinar las mejores condiciones en la desinfección de coliformes totales, y E. coli en PP2	130
A1. 1. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Cloro residual libre	141
A1. 2. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a pH.....	141
A1. 3. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Absorbancia UV _{254nm}	142
A1. 4. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Nitratos	142
A1. 5. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Alcalinidad.....	143
A1. 6. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Manganeso	143
A1. 7. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Hierro	144
A1. 8. PPRM1, ORP con respecto a Cloro residual libre.....	144

A1. 9. PPRM1, ORP con respecto a pH	145
A1. 10. PPRM1, ORP con respecto a Absorbancia UV _{254nm}	145
A1. 11. PPRM2, ORP con respecto al Cloro residual libre	146
A1. 12. PPRM2, ORP con respecto a pH	146
A1. 13. PPRM2, ORP con respecto a Absorbancia UV _{254nm}	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Principales métodos de desinfección del agua. Tomado de (CONAGUA, 2019).....	28
Tabla 2. 2. Valores de ORP en mV para algunos desinfectantes con alto poder oxidante. Tomado de (Cañizares Macías & Duarte Lisci, 2012).....	29
Tabla 2. 3. Valores de ORP en mV de algunas sustancias partícipes en la desinfección del agua. Tomado de (Cañizares Macías & Duarte Lisci, 2012); (Fagundo Castillo, et al., 2005)	29
Tabla 2. 4. Formas comerciales que se presenta el cloro. Tomado de Desinfección del agua (OPS/ OMS, 1999)	31
Tabla 2. 5. Agentes patógenos y organismos productores de toxinas superficiales, Tomado de (de Vargas, 2004)	37
Tabla 2. 6. Valores de C*t para el 99% de Inactivación de Organismos Patógenos. Tomado de (Ellis, 1991).....	42
Tabla 2. 7. Procesos de potabilización de las PP de la CDMX. Adaptado de CONAGUA (2018).....	43
Tabla 2. 8. Distribución del sistema de bombeo PP Río Magdalena.....	48
Tabla 3. 1. Justificación de los parámetros de interés seleccionados en la investigación.....	72
Tabla 3. 2. Técnicas y métodos analíticos usados.....	73
Tabla 3. 3. Valores reportados de control de desinfección en PP. Tomado de CONAGUA (2019).....	76
Tabla 3. 4. Guía de dosificaciones establecidas para la desinfección simulada en lote a través del sistema.....	78
Tabla 3. 5. Condiciones de experimentación PPRM1.....	82
Tabla 3. 6. Condiciones de Experimentación PPRM2	84
Tabla 3. 7. Condiciones de experimentación para construir las cinéticas de desinfección de cada PP.....	86
Tabla 3. 8. Condiciones de trabajo empleadas para llevar a cabo las pruebas de recrecimiento en la desinfección simulada de las PP.....	87
Tabla 4. 1. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Chick en PP1.....	114
Tabla 4. 2. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Chick en PP2.....	115
Tabla 4. 3. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Watson Chick en PP1	118

Tabla 4. 4. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Watson Chick en PP2	119
Tabla 4. 5. Valores obtenidos de los estudios experimentales realizados, bajo las mejores condiciones de desinfección en cada PP	125
Tabla 4. 6. Resultados del ANOVA realizado con respecto a la calidad del agua FQyB determinada en los puntos AC (PP1) y CR (PP2)	126
Tabla 4. 7. Resultados del ANOVA realizado en el proceso de desinfección con cloro el punto ED, con respecto al influente en el punto AC de la PP1	127
Tabla 4. 8. Resultados del ANOVA realizado en el proceso de desinfección con cloro el punto ECD, con respecto al influente en el punto CR de la PP2	127
Tabla 4. 9. Resultados del ANOVA realizado en la desinfección simulada con cloro del punto AC, con respecto a la calidad FQyB determinada en el agua muestreada del mismo punto en la PP1.....	128
Tabla 4. 10. Resultados del ANOVA realizado en la desinfección simulada con cloro del punto CR, con respecto a la calidad FQyB determinada en el agua muestreada del mismo punto en la PP2	128

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)** y **Facultad de Ingeniería** por su aceptación dentro de sus planteles e innumerables lecciones a lo largo de mi trayectoria académica.

Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** por el uso de sus instalaciones y los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de esta Tesis de Maestría de Especialidad en Ingeniería Sanitaria.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por el apoyo económico otorgado durante mi estancia en la Tesis de Maestría, el cual permitió concentrar toda mi atención en el desarrollo de la investigación.

A la **Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI)**, un especial y valioso agradecimiento, particularmente al proyecto con número de convenio 9216c19 y titulado: "Mejoramiento de los Procesos de Potabilización y Tratamiento de Agua Residual y Uso de Tecnologías Descentralizadas en los 21 Proyectos de Regulación como Estrategia Auxiliar para el Aseguramiento Hídrico del Río Magdalena por su apoyo económico como beca, durante mi estancia en la Especialidad, en la que se obtuvieron resultados suficientes para el comienzo de este trabajo de Maestría, dando paso al seguimiento de la investigación durante la Especialidad.

A la **Dra. Alma C. Chávez Mejía**, por darme la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo, compartir su conocimiento, y diversas enseñanzas durante mi estancia en una de las instituciones de gran prestigio dentro de la Universidad y el país.

Al **Dr. Rafael Magaña López**, por guiarme a lo largo de mi trayectoria académica, compartirme sus inmensas aportaciones dentro del área de la desinfección, así como sus consejos y experiencias para la mejora de la investigación.

RESUMEN

El objetivo general de esta investigación fue establecer las condiciones favorables de operación en el sistema de desinfección del agua mediante cloración, dentro de una planta potabilizadora de la CDMX, empleando el potencial óxido reducción como herramienta de control de proceso. Para ello, se realizó un muestreo compuesto en agosto 2022 mediante la toma de cuatro muestras puntuales de las 7:00 a 19:00 horas, en el cuerpo de agua Río Magdalena, en el sitio denominado Antes de Captación (AC). La muestra se preservó a 4 °C hasta su uso, en el laboratorio, se comenzó con la determinación de la calidad inicial del agua midiendo: Potencial Óxido Reducción (ORP), Hierro, Manganeseo, Absorbancia UV254nm, Carbón Orgánico Total, Demanda Química de Oxígeno, Cloro Residual Libre y Total, Coliformes Totales y *E. coli*, Color Aparente y Verdadero, pH, Sólidos Disueltos, Suspendidos y Totales, Turbiedad, y Alcalinidad Total. Posteriormente, se usó un agitador múltiple con capacidad de 6 plazas como sistema de desinfección simulada en lote, en el que, en vasos de precipitados se racionó un volumen de muestra de 1 L para cada plaza y en cada volumen muestra, se depositó una concentración preestablecida de cloro como hipoclorito de sodio (NaClO) teniendo un total de 24 dosificaciones para el punto AC fijando un tiempo de contacto de 5 min por cada dosificación, estas condiciones se usaron con el fin de tener un ensayo exploratorio el cual, se tomara como referencia para la siguiente etapa del estudio, al término de este tiempo, se determinó ORP y pH, se agregó 0.1 g tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) y se midió Cloro Total, Cloro Residual Libre, Coliformes Totales y *E. coli*, optando por seleccionar aquellos parámetros que tuvieran influencia directa sobre el proceso de desinfección, dada la calidad inicial.

El análisis de los resultados obtenidos, permitió realizar un nuevo muestreo puntual en AC y adicionando un nuevo punto denominado Captación Río (CR), ubicados como influentes de las Plantas Potabilizadoras Río Magdalena (PPRM) y Río Magdalena 2 (PPRM2), Alcaldía Magdalena Contreras, las muestras se conservaron a 4°C hasta su uso para estudios de desinfección, en el cuál, se repitió el proceso descrito en el párrafo anterior, está vez estableciendo seis dosificaciones para el primer punto y 12 para el segundo, con base a la experiencia del ensayo exploratorio, y asumiendo calidad de agua similar entre ambos puntos, de acuerdo con la calidad inicial observada para el punto CR.

Como parte de los resultados obtenidos, en el ensayo exploratorio de desinfección, en el que se abarcaron dosificaciones suficientes para mostrar la actividad patógena en la adición creciente de cloro y con el tiempo de contacto fijo en cinco minutos, se obtuvo un ORP inicial de 242 mV, 738 UFC/100 mL de Coliformes Totales, 86 UFC/100 mL de *E. coli* y 0.04

mg/L de CRL, y en las curvas resultantes (Curvas para ubicar el Punto de Quiebre), se ubicaron las variables de interés en la desinfección, en primera instancia se mostró el valor mínimo presente como cloro residual, el cual indicó la concentración mínima de cloro que debe estar presente en esta muestra para comenzar la inactivación o destrucción de los organismos indicadores, tanto Coliformes Totales como *E. coli*, detectando un ORP de 385 mV, valor que no es suficiente para asegurar la calidad microbiológica en agua potable, en esta etapa se cuenta con una concentración de 4 UFC/100 mL en cuanto a Coliformes Totales y 0 UFC/100 mL en *E.coli*. Sin embargo, se encontró que a un ORP de 600 mV se mostró la ausencia total de estos organismos, a este valor se obtuvo 0.07 mg/L de CRL y la dosificación correspondiente fue de 0.5 mg/L, se está hablando de concentraciones muy bajas en comparación con los LMP de la NOM-127-SSA1-1994 que van de 0.2 – 1.5 mg/L, y aunque no se alcanza el mínimo recomendado, se presume que con dosificaciones muy bajas de cloro es posible inactivar o destruir los organismos patógenos como CT y *E. coli*.

Del exploratorio, se obtuvieron las dosificaciones exactas en las que el punto de quiebre se hizo presente, la prueba comenzó con ORP de 244 mV, 738 UFC/100 mL de Coliformes Totales, 30 UFC/100 mL de *E. coli* y 0.04 mg/L de CRL. De estas dosificaciones, el CRL mínimo nuevamente presentó un valor de 0.03 mg/L con una concentración dosificada de cloro de 0.175 mg/L, en este punto se obtuvo un ORP de 292 mV con una concentración de 8 UFC/100 mL y 0 UFC/100 mL para Coliformes Totales y *E. coli*, respectivamente. Por otra parte, al igual que en el caso anterior, se mostró ausencia de estos organismos a un valor de 600 mV, con una concentración de CRL de 0.05 mg/L y 5 mg/L de cloro dosificado.

En cuanto a la PPRM2, siguiendo el mismo análisis, se comenzó la prueba con ORP de 225 mV, 738 UFC/100 mL de Coliformes Totales, 8 UFC/100 mL de *E. coli* y 0.08 mg/L de CRL, Figura 3. El punto de quiebre se da en 0.08 mg/L como CRL, cuyas dosificaciones fueron de 0.225 y 0.275 mg/L, y para este último valor, se muestra una concentración de 8 UFC/100 mL para Coliformes Totales y 0 UFC para *E. coli*, con un valor de ORP de 388 mV. La desinfección completa se obtuvo al llegar a un ORP de 457 mV, con 0.4 mg/L de cloro dosificado, arrojando 0.09 mg/L de CRL y ausencia de estos patógenos.

Por otra parte, se trabajó con los modelos de desinfección cinética Chick y Watson Chick, en los que se mostró que con un rango de dosificación de 0.5 mg/L a 0.4 mg/L, se obtenían velocidades de inactivación k de 0.7235 y 1.1932 en la PP1 y con respecto la PP2 22.46 y 14.5, con ajustes en r^2 de 0.53, 0.95, 0.57, 0.64, respectivamente, donde este último fue el único caso en el que se determinó que la concentración del desinfectante fue más relevante que el tiempo de contacto, con un $n > 1$, para los otros tres casos, ocurrió lo contrario.

Finalmente, se empleó la superficie de respuesta para mostrar las mejores condiciones de desinfección y así determinar la potencialidad del ORP con respecto a la inactivación de coliformes totales y *E. coli*, este análisis mostró que la ausencia de estos organismos se mantiene en un intervalo de valores de 410 a 490 mV, siempre que se empleen las dosificaciones antes mencionadas (0.5 y 0.4 mg/L) en la PP1 y PP2, mostrando así que no es necesario sobreclorar las PP para lograr obtener agua potable, libre de estos organismos.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo, se abordan las actividades realizadas durante el tercer semestre, y las observaciones realizadas previamente en el periodo anterior para el proyecto titulado "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN CON CLORO EN UNA PLANTA POTABILIZADORA DE LA CIUDAD DE MÉXICO". Durante esta segunda revisión, se menciona la importancia de su implementación en la línea de investigación, y la aportación que tienen a la ingeniería ambiental en materia de aseguramiento de calidad del agua potabilizada. Si bien es cierto que existen numerosas técnicas y métodos de desinfección, es crucial poseer una herramienta a todos estos métodos, que garantice la seguridad el agua potable para el consumo humano, y a su vez que sea con un menor costo de determinación, menor tiempo y cuyo dato obtenido sea confiable.

Así mismo, se retoman algunos conceptos teóricos importantes durante el estudio, tales como Potencial Óxido Reducción (ORP), Desinfección, Cloración al punto de quiebre y organismos indicadores usados en agua potable, así como algunos históricos que sirvieron de interés particular para el desarrollo de esta investigación. Para ello, se seleccionó la Planta Potabilizadora Río Magdalena (PPRM) ubicada en la alcaldía Magdalena Contreras y administrada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), de ella se obtuvieron datos sobre sus procesos de potabilización, operación, caudal de operación, así como algunos datos históricos de calidad del agua a la entrada y salida de la PP.

También, son revisados los sitios de estudio que son fundamentales para conocer las circunstancias en las que se pretende trabajar tales como la localización y delimitaciones de la fuente de abastecimiento de esta PP, que es el Río Magdalena y su descripción al paso del tiempo, se hace énfasis en la calidad cambiante desde su nacimiento a la PP y por último a la zona urbana.

Con relación a la situación actual por la que se atraviesa, se habla sobre, el virus SARS-CoV-2, causante de la COVID-19, ya que dicho tema, será parte de investigaciones del sector hídrico y la manera en la que pudiera afectar a los consumidores de agua potable.

Finalmente, se aborda el capítulo de metodología el cuál, comprende la descripción y desarrollo de cada etapa experimental que se tienen contemplada, mediante un diseño de experimentos que va de lo esencial, a lo particular, cuyos objetivos planteados en el trabajo, puedan ser abarcados y en el mejor de los casos, cumplidos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Justificación

Actualmente, la gestión hídrica es un tema de interés mundial, en el que se destaca no sólo el abastecimiento en cantidad y calidad suficiente, sino también su cuidado y saneamiento, mencionados dentro de las metas de la agenda 2030 en el objetivo número 6, “**agua limpia y saneamiento**” (ONU, 2015). Así mismo, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos dentro del artículo 4º, advierte este derecho como parte fundamental para el bienestar de la población (CPEUM, 2011).

La provisión de agua para el consumo humano en la cantidad y calidad necesaria incide directamente en la salud y bienestar de la población (CONAGUA, 2017). De acuerdo con el último informe del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA, 2020), “Agua y Salud Nacional”, en México se reportó una cobertura de acceso al agua entubada del 95.30% al año 2015, la cual representa un crecimiento del 17.7% desde 1990 y cuya cobertura nacional fue del 78.40%. Por su lado, la Ciudad de México (CDMX) alcanzó un suministro del 98.91% durante el mismo periodo (CONAGUA, 2018).

Para garantizar la calidad del agua, el país cuenta con 932 Plantas Potabilizadoras (PP) en operación, de las cuales, 48 PP se encuentran en la CDMX produciendo un caudal de 3.78 m³/s de los 5.14 m³/s de su capacidad instalada (CONAGUA, 2018 B).

Cada una de estas PP trabaja bajo el concepto de sistemas de barreras múltiples donde el más importante (e inclusive la única) es la desinfección,

considerada para la destrucción o inactivación de organismos patógenos al ser humano, siendo la cloración el método dominante (CONAGUA, 2019).

Se tiene conocimiento del uso de la cloración debido a la gran ventaja del efecto residual que tiene el cloro sobre todos los desinfectantes, garantía inmediata que permite asegurar la ausencia de patógenos en agua potable. Entre otros beneficios se encuentran; su economía, el tiempo de contacto mínimo para su desinfección y su alta eficiencia del 92.7% en remoción microbiológica en la red del país (SINA, 2020). Sin embargo, de acuerdo con la CONAGUA (2019) este sistema también presenta desventajas relevantes para el desarrollo de esta tecnología, tales como la presencia de subproductos como potenciales compuestos cancerígenos (Rosero, et al., 2004) dependiendo de la calidad entregada en las etapas previas.

De hecho, la OMS (2006) reveló que el uso descontrolado del cloro como método de desinfección incide a la formación de trihalometanos, cuyo componente principal es el cloroformo y algunos ácidos cloroacéticos, subproductos que incrementan la mortalidad por cáncer después de un consumo prolongado. En la mayoría de las PP se prefiere dosificar el cloro con el método de goteo constante, asegurando la desinfección del agua (CONAGUA, 2019) sin tomar en cuenta el nivel de toxicidad generado por este descuido. Lo anterior, debido a los altos costos que representa un sistema automatizado con monitores de control.

Por otro lado, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 recomienda tener una concentración de Cloro Residual (CR) que asegure la ausencia de organismos potencialmente riesgosos a la salud humana, cuyos valores están entre 0.5 y 1.5 mg/L de CR. Siendo deseable contar con laboratorios dentro de las PP que lleven a cabo análisis periódicos mediante los cuales se vigile este parámetro (OMS, 1971).

No obstante, el monitoreo que se tiene sobre el intervalo de valor aceptado muchas veces es nulo y carece de importancia ya que, los métodos de medición son diversos, laboriosos y en gran parte, costosos (CONAGUA, 2019).

Las medidas para prevenir un riesgo a largo plazo de los subproductos, no deben originar riesgos adicionales a corto plazo (OPS, 2000). Su reducción sólo puede lograrse introduciendo tratamientos específicos y tecnologías

que puedan brindar el servicio de agua potable libre de organismos causantes de enfermedades diarreicas, principalmente en niños y cuya tasa nacional de mortalidad en 2018 fue de 5.46 por cada 100 mil menores de cinco años (SINA, 2020).

Tomando en cuenta los puntos anteriores, es preciso actualizar las técnicas de control de desinfección que prevean los riesgos causantes del cuadro crónico mencionado y llevar a cabo una propuesta en la Normatividad Mexicana vigente, la cual no contiene ningún apartado sobre los subproductos provenientes del uso del cloro, ya sea como Cl_2 , $\text{Ca}(\text{ClO})_2$, NaClO o cal clorada (CONAGUA, 2019), (Wegelin, *et al.*, 1998) . En este trabajo se propone retomar una publicación realizada por la OMS (1971) la cual asevera que: existe una relación exponencial entre la velocidad de inactivación de los virus y el Potencial Óxido Reducción (ORP) o Potencial REDOX. Un ORP de 650 mV (medido con un electrodo platino/calomel) provocará la casi instantánea desactivación de los virus incluso en altas concentraciones” (OMS, 2006).

Actualmente no se conocen estudios que determinen un valor funcional y estándar para agua potable, de acuerdo con la OMS (2006) este valor debe analizarse caso por caso según el influente a tratar. Sin embargo, se desea profundizar en la investigación y evaluación del uso del potencial Redox, como técnica de monitoreo operativo durante la barrera de desinfección con cloro debido a ser una técnica de fácil control que podría instalarse en línea.

Un valor controlado de ORP en conjunto con el método de desinfección más usado en el país, puede asegurar la ausencia de organismos microbiológicos dañinos a la salud humana. Organismos que actualmente son cuantificados mediante diversas técnicas analíticas las cuales, requieren de un mínimo de 24 horas para obtener resultados que indiquen los niveles de concentración existentes en el agua.

Así mismo, puede prevenir la presencia de los ya mencionados subproductos por un exceso en las dosis de cloración dentro de las PP. La exploración de este recurso permitirá contar con registros que avalen la eficiencia de desinfección, sin descuidar la concentración de Cl libre permitida por la NOM-127-SSA1-1994.

No se desea remover el método tradicional de goteo para la desinfección, únicamente se busca minimizar la dosis empleada de cloro en sus diversas formas, reduciendo a su vez, costo en insumos y ahorro de tiempo en aseguramiento de la calidad necesaria para el consumo de agua potable.

Aunque no existe una relación directa entre la concentración de Cl libre y el valor de ORP, el desarrollo de la cinética de desinfección correcta puede orientar el grado de ausencia e inactivación de organismos patógenos en agua potable y el nivel de toxicidad que puedan ocasionar estos compuestos provenientes del uso del cloro.

Los registros periódicos de ORP que se obtengan, fungirán como base para llevar esta técnica a otros sistemas de desinfección que usen cloro, en donde se deberá probar su eficiencia como método apto para el consumo humano.

De tal forma que, el presente proyecto busca encontrar condiciones que favorezcan y optimicen el sistema de desinfección a través del parámetro de monitoreo ORP, el cual asegurará la ausencia de patógenos en agua y a su vez, la reducción de subproductos provenientes de la cloración. Sin requerir de las pruebas que conllevan un tiempo mayor a un día en la obtención de resultados concluyentes. Llevando la propuesta a la ejecución dentro de una PP de la CDMX y en consecuencia a las PP en condiciones similares.

1.2 Hipótesis

Existe un intervalo de valores de ORP que aseguran la ausencia o inactivación de los organismos Coliformes y *Escherichia coli* (*E. coli*) en el agua potable de abastecimiento público, sin descuidar la concentración de cloro residual dictada por la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano para su adecuada desinfección.

1.2.1 Hipótesis Nula (H_0)

No existe un intervalo de valores que aseguren la ausencia o inactivación de los organismos Coliformes y *E. coli* en agua potable.

1.2.2 Hipótesis Alterna (H_1)

Existe intervalo de valores que aseguren la ausencia o inactivación de los organismos Coliformes y *E. coli* en agua potable.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Establecer las condiciones favorables de operación en el sistema de desinfección del agua mediante cloración, dentro de una planta potabilizadora de la CDMX, empleando el potencial óxido reducción como herramienta de control de proceso.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar la calidad fisicoquímica en los puntos dentro de una PP de la CDMX, tomando como referencia algunos parámetros relevantes en la desinfección del agua establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.
- Valorar la relación entre el ORP y la inactivación de organismos Coliformes y *E. coli* analizando el punto de quiebre.
- Establecer la optimización del proceso en función de la respuesta del cloro residual respecto al parámetro ORP, por medio de su cinética de desinfección.
- Determinar la potencialidad del parámetro ORP como herramienta de control útil para sistemas de desinfección mediante un análisis de superficie de respuesta.

1.4 Alcances y limitaciones

El desarrollo de este trabajo se centrará en una PP monitoreada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), y se identificará su potencialidad para ser extendida a otras PP con condiciones similares. Busca presentar una propuesta de optimización en el control de los sistemas de desinfección de esta PP.

También ofrece reducción del tiempo y costo que implica llevar a cabo estudios de calidad en los sistemas de desinfección de las PP, donde en su mayoría, no se tiene un control sobre las dosis altas de cloro que pueden

originar la presencia de subproductos. Las tecnologías para medir la eficiencia de desinfección son basadas en asegurar la ausencia de patógenos en agua, más no se tiene un control sobre la regulación de la concentración de Cl₂ sugerida por la normatividad mexicana.

Se busca asegurar la desinfección del agua, liberándola en un 100% de organismos del grupo Coliforme y *E. coli* mediante un rango de valores de ORP, en los que no se requiera la inyección de altas dosis de cloro que puedan originar la presencia de subproductos que lleguen a ser cancerígenos a lo largo de un tiempo constante de exposición.

Dada la funcionalidad de esta técnica de monitoreo, se ve necesario presentar la propuesta de la actualización de la normatividad mexicana como un parámetro indispensable en el control y cuidado de la desinfección del agua.

Los valores de ORP obtenidos deberán servir como referente para estudios posteriores que refuercen la utilidad y factibilidad del uso de este parámetro para asegurar la ausencia de organismos patógenos en agua potable.

Dichos valores, pueden ser el inicio de la actualización de la normatividad vigente, es necesaria la indagación de técnicas recientes y prometedoras que evalúen los sistemas de potabilización en un periodo de tiempo corto y que impliquen una reducción de los costos que actualmente se tienen por técnica.

1.5 Normatividad

Con base en las reformas constitucionales en materia de derechos humanos del 10 de junio de 2011, del artículo 4º. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, establece que el derecho al agua potable y al saneamiento es fundamental e indispensable para la realización, goce y disfrute de los demás derechos humanos, cuya preservación en cantidad, calidad y sustentabilidad es tarea fundamental tanto del Estado como de la sociedad, por cuanto a que tal derecho está basado en las premisas de un acceso al bienestar de toda la población, sustentando por los principios de igualdad y no discriminación, independientemente de las circunstancias sociales, de género, políticas,

económicas o culturales propias de la comunidad en la que opera, esto de acuerdo con.

En México se cuenta con un marco jurídico desde 1996 para controlar en forma gradual la contaminación y establecer metas de tratamiento en función del reúso del agua tratada o su disposición final, ha sido gracias a dicha norma, que el agua tratada se duplicó a partir de esta fecha, además de esta norma, existen otras que son responsabilidad de la CONAGUA, de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y de la Secretaría de Salud. Éstas son referidas a la calidad de los cuerpos de agua y del agua potable (Jiménez, et al., 2010).

Entre las más importantes, se encuentran la NOM-011-CONAGUA-2015 relacionada con la conservación del recurso del agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, NOM-015-CONAGUA-2007 que es sobre la infiltración artificial de agua a los acuíferos (CONAGUA, 2018), o bien la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Esta última norma considera que se necesita que el agua posea una calidad adecuada para el uso y consumo humano, siendo posible el establecimiento de los límites máximos de calidad y los tratamientos de potabilización del agua. Se aplica a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Potencial Óxido Reducción

2.1.1 Descripción del parámetro

El Potencial Óxido Reducción (ORP por sus siglas en inglés) o REDOX es una medida en milivoltios (mV) del nivel de oxidación el agua. La palabra “potencial” se refiere a la habilidad en lugar de la acción, la energía potencial es la energía almacenada y lista para ponerse en acción (Hybrid, 2021).

Es una forma de medir la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo y convirtiéndola en energía eléctrica (PUREWATER, 2019), para ello, una sonda de ORP toma una medida de voltaje en un circuito formado por un electrodo de referencia de plata (polo negativo del circuito) y toma otra medida del electrodo construido sobre una banda de platino (polo positivo), con agua entre ambos (Hybrid, 2021).

El potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y negativo cuando se produce una reducción. Newman (2004) definió oxidación como un aumento en el número de oxidación positivo con la correspondiente pérdida de electrones y reducción como una disminución en el número de oxidación positivo de un ion con una ganancia correspondiente de electrones.

2.1.2 Uso del ORP en la inactivación o destrucción de virus y bacterias.

Los electrodos de ORP fueron estudiados en la Universidad de Harvard en 1936, estos estudios mostraron una fuerte correlación de ORP y la actividad bacteriana, estas pruebas fueron confirmadas por estudios sobre el agua potable y de piscinas en otras zonas del mundo (PANACHLOR, 2021).

En 1971, la Organización Mundial de la Salud (OMS) adoptó la medida del potencial REDOX como la más fiable para medir la calidad sanitaria del agua potable. La publicación INTERNATIONAL STANDARDS FOR DRINKING WATER (Tercera edición, Ginebra, 1971) afirma:

“Hay una relación exponencial entre la velocidad de inactivación de los virus y el ORP. Un ORP de 650 mV (medido con un electrodo platino/calomel) provocará la casi instantánea desactivación de los virus incluso en altas concentraciones”.

Datos de la OMS indicaron que con el mismo valor en aguas de lavado o consumo puede destruir estas bacterias sin importar el nivel de cloro libre a un pH de 7.6 a 7.8 unidades de pH. Sin embargo, el cloro libre y ORP no son una relación lineal, es decir, un aumento de 10 veces en cloro libre no produce un aumento correspondiente de 10 veces en milivoltios (Newman, 2004).

Trevor & Suslow, (2004) en su artículo *“Introduction to ORP as the Standard of Postharvest Water Disinfection Monitoring”*, habló sobre desinfección postcosecha con ORP y sobre como una de las ventajas en el uso de ORP es que el monitoreo del sistema de agua proporciona al operador, además de una rápida evaluación, un solo valor del potencial de desinfección del agua en un sistema post-cosecha. La investigación demostró que un valor de ORP de 650 a 700 mV resulta en la eliminación de bacterias tales como *Escherichia coli (E. coli)* y *Salmonella* en pocos segundos. Las levaduras causantes de pudriciones y el tipo más sensible de hongos que forma esporas, también son eliminados a este nivel después de un tiempo de contacto de pocos minutos.

2.1.3 Uso del ORP como indicador del buen desempeño de desinfección del agua

De acuerdo con Newman (2004), los productos químicos que son oxidantes fuertes, como el cloro, el bromo y ozono son excelentes agentes desinfectantes, pues la acción higienizante es causada por una alteración de la estructura química de organismos no deseados. Es decir, los compuestos oxidantes “quemán” los agentes patógenos, así como cualquier otro material orgánico en el agua, dejando unos pocos productos químicos inofensivos como subproductos (González Sánchez, 2018).

Cuando se hayan reaccionado todos los materiales oxidantes y reductores, se alcanza el equilibrio y suele haber un sobrante. Este sobrante es lo que crea el potencial de oxidación o de reducción en una solución (Hybrid, 2021).

Este parámetro representa la actividad del desinfectante en el agua en vez del nivel de concentración (en ppm o mg/L) del mismo. Las medidas de ORP permiten que evalúe la eficiencia del tratamiento del agua, sin importar el tipo de oxidante ni la combinación de la fórmula desinfectante (Hybrid, 2021).

En la desinfección del agua es muy importante tanto en la concentración de cloro libre y el tiempo de contacto con el agua como el pH y la temperatura. Un buen control de la desinfección exigirá una monitorización no solo del cloro sino del potencial redox del medio (ACOUATECNOLOGÍA, 2021), la ventaja más importante del uso de ORP para el seguimiento de las propiedades desinfectantes, es la rápida evaluación que se puede llevar a cabo en tiempo real (Newman, 2004).

2.2 Sistemas de desinfección

El objetivo de la desinfección es garantizar la calidad del agua desde el punto de vista microbiológico y asegurar su inocuidad para la salud del consumidor, eliminando los microorganismos capaces de producir enfermedades. La desinfección para consumo humano puede ser de tipo físico o químico. La primera, utiliza la aplicación directa de energía, térmica o de radiaciones, mientras que la segunda, aprovecha fundamentalmente la capacidad oxidante de ciertos productos químicos para desarrollar su eficiencia desinfectante (del Barrio de Vergara, 2015).

Los desinfectantes de agua se seleccionan por su capacidad para destruir eficazmente los organismos causantes de enfermedades transmitidas por el agua en concentraciones, o dosis, que son inofensivas para el consumidor sin crear problemas indeseables de sabor y olor y por estar dentro de límites de costo aceptables (Ellis, 1991). Entre los desinfectantes más utilizados se encuentran los mostrados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Principales métodos de desinfección del agua. Tomado de (CONAGUA, 2019)

Métodos Físicos	Filtración
	Temperatura
	Radiación (solar, luz UV, Gamma)
	Procesos electrolíticos
	Yodo

Métodos Químicos	Bromo
	Plata
	Ozono
	Cloro

La selección de un desinfectante químico depende de una serie de condiciones propias de cada sistema de abastecimiento, entre las que se pueden destacar: proporcionar agua libre de patógenos, evitar la producción de subproductos de la desinfección y mantener una calidad bacteriológica en la red de abastecimiento, evitando los recrecimientos bacterianos.

Algunos desinfectantes poseen un poder oxidante que los vuelve viables para ser relacionados con el parámetro ORP, tales como los mostrados en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Valores de ORP en mV para algunos desinfectantes con alto poder oxidante. Tomado de (Cañizares Macías & Duarte Lisci, 2012)

DESINFECTANTE	FÓRMULA	ORP (mV)
Cloro	Cl ₂	1.3
Ozono	O ₃	2.07
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂	1.78
Ácido hipocloroso	HOCl	1.49
Ácido hipobromoso	HOBr	1.33
Dióxido de cloro	ClO ₂	0.95
Hipoclorito de sodio	NaClO	0.66

Adicionalmente, las sustancias que tienen una participación con algunos de estos desinfectantes, también poseen un valor de OPR, en las reacciones ocurridas durante la desinfección, como es el caso de las siguientes, Tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Valores de ORP en mV de algunas sustancias partícipes en la desinfección del agua. Tomado de (Cañizares Macías & Duarte Lisci, 2012); (Fagundo Castillo, et al., 2005)

PARÁMETRO	SÍMBOLO	ORP (mV)
------------------	----------------	-----------------

Hierro	Fe	0.77
Manganeso	Mn	1.51
Sulfato	SO ₄	0.29
Nitrógeno amoniacal	NH ₃	0.69

2.2.1 Mecanismo de funcionamiento químico

El mecanismo de desinfección de los agentes químicos, se basa en la reacción con las enzimas esenciales para los procesos metabólicos de las células vivientes (patógenos) destruyéndolas o inactivándolas. En la desinfección química, la eliminación de microorganismos patógenos, objeto de este tratamiento, depende entre otros, de los siguientes factores.

- a) Tipo y concentración de los microorganismos que deben destruirse
- b) Tipo y concentración del desinfectante y tiempo de contacto
- c) Características fisicoquímicas del agua a tratar.

2.2.2 Generalidades de la cloración

La práctica de la cloración, retoma parte de su origen en 1851 en Londres, para desodorizar lodos, más tarde en 1854 John Snow, un doctor inglés determinó la muerte de una gran cantidad de personas a causa de cólera, la cual evitó su expansión mediante el cierre de todos los sistemas de bombeo de agua, y condujo a científicos a adquirir interés por la búsqueda de organismos patógenos en agua (Jaramillo, 2010). En agua, como método continuo de desinfección se empleó hasta 1908 en Bublely Creck, Chicago (CONAGUA, 2019). Actualmente, la desinfección de los sistemas de abastecimiento de agua potable se lleva a cabo mediante el uso de cloro gas o compuestos de cloro de forma prácticamente universal.

El mecanismo de funcionamiento del cloro está determinado por dos tipos de daño a las células, por un lado, afecta la integridad de la membrana y obstruye su permeabilidad y por otro, altera funciones celulares (daña enzimas y ácidos nucleicos). De tal forma que, la reacción de los microorganismos ante el cloro está determinada por la resistencia de sus membranas, así como por la relativa afinidad química de este compuesto con las sustancias vitales del organismo (CONAGUA, 2019).

La desinfección con cloro puede llevarse a cabo mediante el uso de gas cloro, o bien de hipocloritos de sodio o calcio (CONAGUA, 2019), siendo estos últimos más fáciles de manipular ya que, en forma de gas, tiene gran capacidad de reacción, es tóxico y produce efectos nocivos sobre el organismo humano (Aeas, 2012). Por su parte, sus formas como hipocloritos, se encuentran diluidas, disminuyendo estos riesgos. La elección del producto más conveniente depende de aspectos técnicos y económicos, tales como; cantidad necesaria de reactivo, posibilidad de abastecimiento, facilidad de operación, costo y seguridad (riesgos relativos al almacenamiento y a las manipulaciones) de acuerdo con Tomaylla, (2017), en la Tabla 2.4 se muestra algunas propiedades de estas formas de cloro.

Tabla 2. 4. Formas comerciales que se presenta el cloro. Tomado de Desinfección del agua (OPS/ OMS, 1999)

COMPUESTOS DE CLORO	FORMA QUE SE PRESENTA EL PRODUCTO	CONTENIDO DE CLORO	ESTABILIDAD EN EL TIEMPO	SEGURIDAD
Cloro gas (Cl ₂)	Gas licuado a presión	99%	Muy buena, tener mucho cuidado con las fugas.	Gas muy tóxico.
Hipoclorito de sodio (NaClO)	Solución líquida amarilla	Máximo 15%	Pérdida mensual del 2 al 4%. Pérdida aún mayor si la temperatura supera los 30 °C.	Líquido corrosivo, contiene sosa.
Hipoclorito de calcio (Ca(OCl) ₂)	Sólido blanco	Del 60 al 70%	Pérdida anual del 2 al 2.5%	Corrosivo, posible inflamación en caso de contacto con ciertos materiales.

En cualquiera de sus formas, el cloro al entrar en contacto con el agua se hidroliza, formando ácido hipocloroso (HOCl), durante el proceso químico de la desinfección se producen cloroaminas, dicloraminas y tricloraminas. De igual manera, son formados el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio. De todos estos compuestos, el HOCl es la especie desinfectante y este mismo se disocia en los iones hidrógenos (H^+) e hipoclorito (OCl^-), adquiriendo propiedades oxidantes (CONAGUA, 2019). Dichas especies están presentes según el pH del agua como se observa en la Figura 2.1.

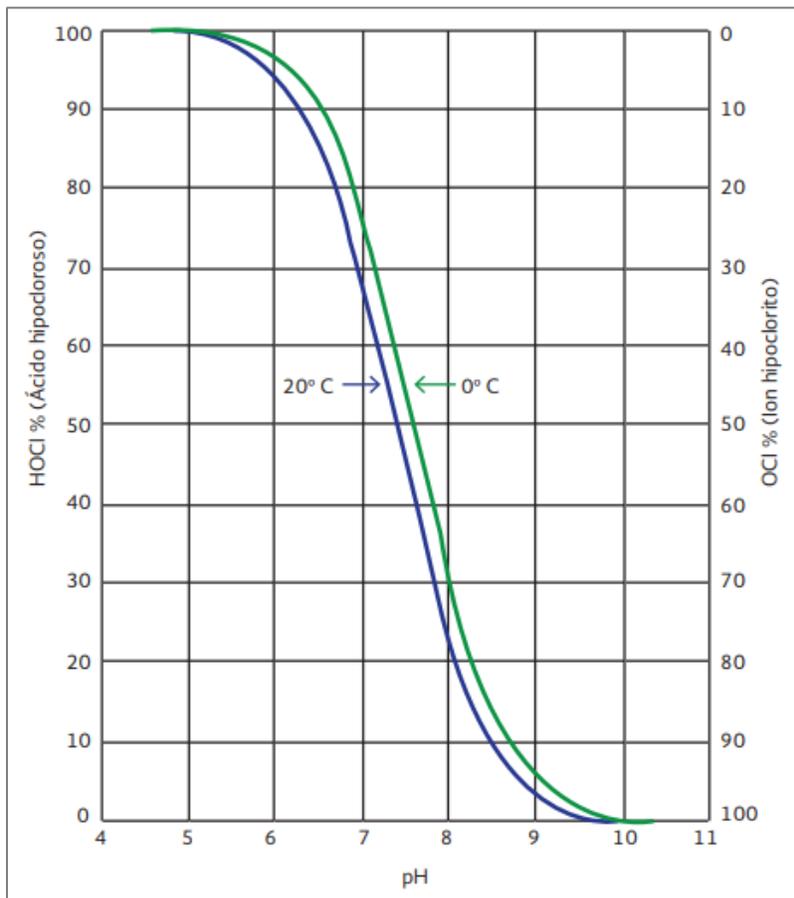
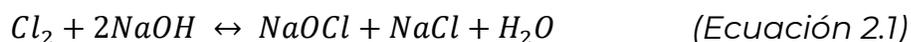


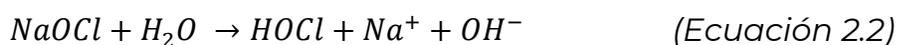
Figura 2.1. Distribución del ácido hipocloroso y del hipoclorito en agua a diferentes valores de pH. Tomada de (CONAGUA, 2019) y adaptada de Tchobanoglous 2012.

Por su parte, el hipoclorito de sodio (NaOCl) se produce al disolver cloro gas (Cl_2) en una solución de hidróxido de sodio (NaCl), adicionalmente también se lleva a cabo la producción de cloruro de sodio (NaCl) y agua (H_2O), Ecuación 2.1.



Esta reacción origina un equilibrio químico entre los diversos componentes. El cloro gas reacciona con el hidróxido de sodio para formar hipoclorito, pero el hipoclorito a su vez se descompone para formar cloro gas e hidróxido de sodio. Ambas reacciones se desarrollan hasta llegar a un punto en que se equilibran mutuamente y se obtienen unas concentraciones estables de cada sustancia. No obstante, a pesar de que establece un equilibrio en esta reacción, al ser el cloro un gas, siempre tiende a evaporarse progresivamente del agua, con lo cual el equilibrio se desplaza continuamente hacia la formación de Cl_2 para compensar el que se ha perdido. Para evitar que el desplazamiento del equilibrio se produzca en forma excesivamente rápida, al hipoclorito sódico comercial se le añade una importante concentración adicional de hidróxido sódico para situar el pH en un valor de alrededor de 12 y aumentar de esta forma su estabilidad. No obstante, el hipoclorito sódico tiende siempre a descomponerse progresivamente, liberando cloro y reduciendo su concentración. Una temperatura ambiente elevada acelerará el proceso (Marcó Gratacós, 2014).

Por su parte, cuando se añade cloro en agua como hipoclorito de sodio, el contacto da como resultado la formación de ácido hipocloroso (HOCl), iones sodio (Na^+) e hidróxido (OH^-) (CONAGUA, 2019), Ecuación 2.2



Esta reacción es muy similar a la de hidrólisis con cloro gas, sin embargo, la adición de hipoclorito de sodio al agua produce iones hidroxilo que incrementan el pH del agua (CONAGUA, 2007).

2.2.3 Cloración al punto de quiebre

Para llevar a cabo la desinfección dentro de los sistemas de potabilización, es necesario conocer la dosis que será necesaria aplicar para llegar a un efecto residual en el cloro, esto es que, aún pasado un tiempo, siga presente la desinfección a lo largo de la línea de distribución de tal forma que, sea un agente desinfectante muy activo. Es común emplear la técnica de punto de quiebre para determinar estas cantidades que serán añadidas al agua potabilizada.

Debido a que el cloro es un agente oxidante fuerte, reacciona, la mayor parte del material en estado reducido (Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S y NH_3), la cantidad de cloro necesaria para obtener cloro residual libre, es determinada experimentalmente, conforme el cloro es añadido, reacciona con la materia oxidable (CONAGUA, 2019).

Dicha técnica consiste en introducir en varios vasos dosis crecientes de cloro, y se determina al cabo de un cierto tiempo el cloro residual mediante algún método analítico cuantificable, se observa a veces que, este valor en lugar de aumentar de forma regular, pasa por un máximo, después decrece, pasa por un mínimo y crece, por último, regularmente (Aeas, 2012), Figura 2.2.

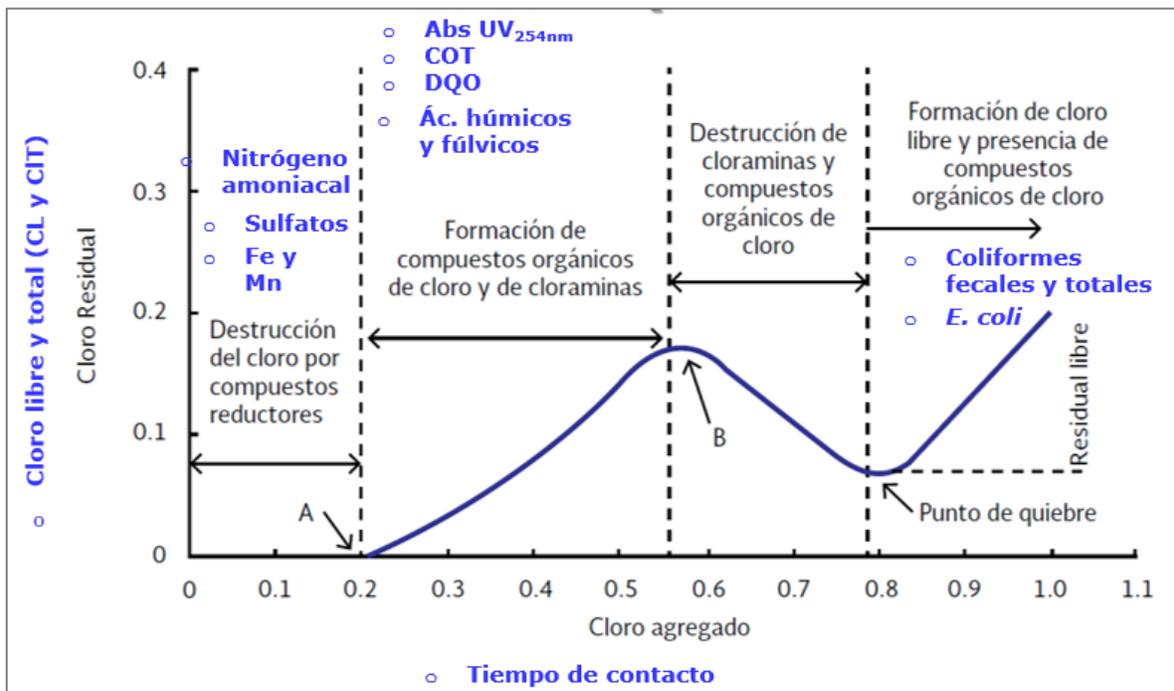


Figura 2. 2. Curva obtenida en la cloración al punto de quiebre. Adaptado de (Aeas, 2012).

El punto de quiebre (PQ) o “*break point*” es la dosis de cloro correspondiente al mínimo de la curva, en el que se ha consumido todo el cloro necesario para eliminar el amoníaco y se han destruido parcialmente las cloraminas que pudieran haberse formado. Como la mayor parte de los compuestos que se han ido formando desprende malos olores, el PQ es la dosis que corresponde al mínimo sabor a cloro del agua, a partir del cual se empiezan a cumplir las garantías higiénicas (Aeas, 2012).

Con respecto a la demanda de cloro, cuantitativamente representa la cantidad que se agrega menos la que se conserva al término de la reacción (cloro residual) y se mide en partes por millón. El tiempo de reacción generalmente se fija en 10 minutos para agua potable. Esto es, la cantidad de cloro que se consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica (CONAGUA, 2007).

A manera de esquema, en la Figura 2.3, los términos descritos anteriormente son clasificados conforma ocurre la reacción en el sistema de desinfección, para su mejor comprensión.

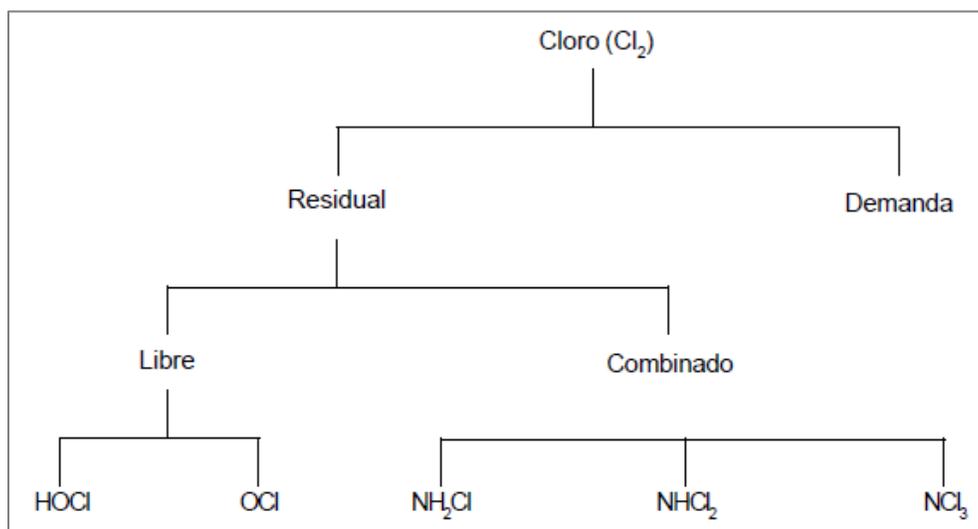
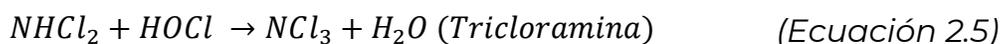


Figura 2. 3. Formas importantes de cloro en la cloración del agua. (Tomada (de Vargas, 2004).

2.2.3.1 Reacciones ocurridas durante la desinfección empleando hipoclorito de sodio

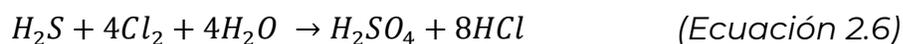
Oxidación de la materia inorgánica

Las reacciones del cloro con compuestos inorgánicos del nitrógeno, tales como el amoníaco, tienen una gran importancia en los procesos de cloración del agua. Cuando se añade cloro al agua que contenga amoníaco, el amoníaco reacciona con el ácido hipocloroso para formar cloraminas, dicloraminas y tricloraminas, ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5, respectivamente. Donde estas también tienen poder oxidante.



La proporción de los productos resultantes de la reacción es función de la temperatura, del pH, del tiempo transcurrido y de la proporción inicial Cl:NH₃. Para valores altos de esta proporción, bajas temperaturas y bajos niveles de pH, se favorece la formación de dicloramina (Aeas, 2012).

Por otro lado, la reacción entre el sulfuro de hidrógeno y el cloro es un ejemplo característico de su efecto sobre las sustancias inorgánicas reductoras (Aeas, 2012), Ecuación 2.6.



Donde el ácido sulfhídrico (H₂S) en combinación con cloro (Cl₂) y agua (H₂O), procede a obtención de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido clorhídrico (HCl).

Oxidación de la materia orgánica

Griffin y Chamberlain, trabajando a finales de la década de 1930, descubrieron que a medida que se añadía cloro en cantidades cada vez mayores al agua que contenía amoníaco, no solo al amoníaco desaparecía (y aparecía hasta cierto punto en proporciones altas de HOCl a NH₃), sino que el cloro residual inicialmente aumentaba, como se esperaba, luego disminuyó y finalmente aumentó de nuevo. Lo llamaron al punto de la reducción máxima del cloro disponible como el "punto de ruptura" (Ellis, 1991). Estequiométricamente, la pendiente inicial del creciente residuo del cloro HOCl está reaccionando con amoníaco para formar sólo la monocloramina hasta que la relación HOCl y NH₃ alcance aproximadamente 5:1, que corresponde al pico de la curva. A medida que la relación HOCl-NH₃ continúa aumentando, la dicloramina se forma, pero como es inestable (Ellis, 1991), procede a descomponerse de acuerdo con la Ecuación 2.7.



Dando como resultado, la pérdida de nitrógeno amoniacal como N₂ y también de cloro en forma de iones cloruro negativos.

Reacción del cloro libre residual

Dentro de este sistema de reacciones, ácido hipocloroso (HOCl) y/o el ion hipoclorito (OCl⁻) se conoce como “cloro libre residual” o como “cloro disponible libre” (Ellis, 1991). Se han completado las reacciones de oxidación de la materia orgánica y el cloro sobrante en el agua, al no tener sustancias orgánicas con las que combinarse, queda en la forma libre y se procede a la destrucción o inactivación de los organismos patógenos (Pérez López & Espígares García, 1995).

El mecanismo de destrucción o inactivación de las células bacterianas vegetativas parece ser principalmente la interrupción de la membrana citoplasmática y la inhibición de la actividad enzimática asociada con ella. La respiración está dañada, la permeabilidad selectiva de la membrana destruida, y el daño irreparable se hace a las funciones metabólicas (Ellis, 1991).

2.3 Organismos indicadores en agua para consumo humano

Las aguas superficiales están expuestas a una amplia gama de factores que pueden alterar su calidad biológica y ocasionar cambios con diferentes niveles de intensidad, tales alteraciones pueden tener su origen en eventos naturales, o actividades antropogénicas (de Vargas, 2004).

La contaminación fecal de las fuentes de aguas superficiales para abastecimiento de consumo humano es uno de los problemas más preocupantes en países emergentes, se ha observado que, es intensa en las zonas de arrastre provenientes de los corrales de engorde, bovinos y de las avícolas (OPS & OMS, 1996).

El uso de aguas superficiales como fuente de bebida, implica un riesgo de transmisión de enfermedades hídricas, los agentes patógenos involucrados en la transmisión por esta vía se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2. 5. Agentes patógenos y organismos productores de toxinas superficiales, Tomado de (de Vargas, 2004)

Bacterias	<i>Escherichia coli, Salmonella, Shigella, Vibrio Cholerae, Yersinia enterocolitica, Campylobacter jejuni.</i>
-----------	--

Virus	<i>Enterovirus, Rotavirus, Adenovirus.</i>
Protozoos	<i>Giardia, Cryptosporidium, Entamoeba histolytica, Balantidium coli.</i>
Helmintos	<i>Ascaris, Trichuris, Taenia.</i>
Cyanobacterias	<i>Anabaena, Microcystis.</i>

Los patógenos mencionados, pueden causar enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde una gastroenteritis simple hasta serios y a veces fatales cuadros de diarrea, disentería, hepatitis o fiebre tifoidea (de Vargas, 2004).

Sin embargo, de esta gran variedad de microorganismos, es necesario seleccionar aquellos que sean fáciles de cultivar en laboratorio, relativamente inocuos para el hombre y los animales y finalmente, su concentración debe tener relación con la cantidad de microorganismos patógenos presentes en el agua, usando comúnmente los coliformes totales y fecales, *Escherichia coli* y las bacterias heterotróficas mesofílicas aerobias viables (OMS, 2017).

2.3.1 Coliformes

De acuerdo con (de Vargas, 2004), los coliformes son un grupo de bacterias que habitan en el intestino de los mamíferos y también se presentan como saprofitos en el ambiente, con excepción de la *Escherichia*, que tiene origen intestinal. Este grupo de microorganismos pertenece a la familia de las enterobacteriáceas, son caracterizadas por su capacidad de fermentar la lactosa a 35-37 °C en un lapso de 24-48 horas y producir ácido y gas.

De manera general se les llama **Coliformes Totales (CT)**, los cuáles, reúnen diversos géneros, entre los principales, *Klebsiella*, *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter* y *Serratia*. Tienen la enzima cromogénica B galactosidasa, que actúa sobre el nutriente indicador ONPG¹, mismo que sirve como fuente de carbono y su efecto consiste en un cambio de color en el medio de cultivo. Son producidos en el ambiente y proporcionan

¹ ONPG: Orto-nitrofenil-β-d-galactopiranosido (de Vargas, 2004)

información sobre el proceso de tratamiento y acerca de la calidad sanitaria del agua que ingresa y circula en el sistema de distribución.

Se conoce que la contaminación fecal del agua está relacionada con la transmisión de agentes patógenos por el agua, denominados **Coliformes Fecales (CF)** o termotolerantes, estos pertenecen a los CT como un subconjunto dentro de ellos. Estos coliformes crecen a una temperatura de incubación de 44.5 °C.

2.3.2 *E. coli*

Se localiza dentro del subconjunto de los coliformes fecales y se considera el principal indicador bacteriano en el agua (Edberg, et al., 2000), fermenta la lactosa y produce ácido y gas, tienen la enzima B glucuronidasa, que actúa sobre el nutriente indicador MUG², este sirve como fuente de carbono y su efecto se visualiza por la fluorescencia en el medio de cultivo.

2.4 Cinéticas de desinfección

2.4.1 Ley de Chick

La desinfección del agua no es un proceso instantáneo ya que se realiza a una cierta velocidad, la misma que está determinada por tres factores; a) tiempo de contacto, b) concentración del desinfectante, c) temperatura del agua. Cuando los microorganismos son expuestos bajo condiciones ideales a la acción de un desinfectante, la tasa de destrucción sigue la ley de Chick (de Vargas, 2004) .

La ley de Chick puede tomarse como referencia para conocer el comportamiento de un determinado proceso de desinfección. Conociendo el número de microorganismos y la cantidad de ellos en un determinado tiempo, se puede determinar el valor de la velocidad de reacción del desinfectante, Ecuación 2.8.

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kCt \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

N_t = Microorganismos sobrevivientes al tiempo de contacto "t"

² MUG: 4-metil-umbeliferil β-d-glucuronico (de Vargas, 2004)

N_0 = Microorganismos al tiempo $t=0$ (inicio de la prueba)
 t = tiempo de contacto
 k =Coeficiente específico de letalidad
 C = Concentración remanente de desinfectante
 n = Coeficiente de dilución

Modelo cinético para la ley de Chick. Tomada de (Magaña Lopez, 2018)y adaptada de (Miranda Rios, 2005)

2.4.2 Watson-Chick

En la práctica, no siempre la desinfección obedece a una reacción como la describe Chick, por ello se presentan desviaciones a su ley, como lo es la de Watson-Chick, aquí la eficiencia de la desinfección depende de la relación entre el tiempo de contacto y la cantidad de desinfectante dosificado, Ecuación 2.9. El tiempo de contacto t , necesario para matar un determinado número de organismos viene dado por la siguiente expresión (Jaramillo Cazco, 2010).

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kC^n t \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Donde:

N_t = Microorganismos sobrevivientes al tiempo de contacto " t "
 N_0 = Microorganismos al tiempo $t=0$ (inicio de la prueba)
 t = tiempo de contacto
 k =Coeficiente específico de letalidad
 C = Concentración remanente de desinfectante
 n = Coeficiente que expresa la eficiencia bactericida del desinfectante y que se conoce como coeficiente de dilución

Modelo cinético para la ley de Watson-Chick. Tomada de (Magaña Lopez, 2018) y adaptada de (Miranda Rios, 2005)

2.4.3 Ley de poder de Hom

Provee un mejor ajuste que los modelos anteriores, para organismos con curvas de sobrevivencia con alta mortalidad en las primeras etapas de vida seguido de una fase más estable, Ecuación 2.10 (Metcalf, 1996).

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = - \frac{\log[1 + N_0^{x-1}(x-1)kC^n t^m]}{(x-1)} t \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Donde:

N_t = Microorganismos sobrevivientes al tiempo de contacto "t"

N_0 = Microorganismos al tiempo $t=0$ (inicio de la prueba)

t= tiempo de contacto

k=Coeficiente de letalidad

C= Concentración remanente de desinfectante

"n" "m" "x" = coeficiente que expresa la eficiencia bactericida del desinfectante y que se conoce como coeficiente de dilución

Modelo cinético para la ley de poder de Hom. Tomada de (Magaña Lopez, 2018) y adaptada de (Miranda Rios, 2005)

2.4.4 El factor Ct como indicador de efectividad del desinfectante

De acuerdo con CONAGUA, (2019), la efectividad de un desinfectante puede ser expresada como C^*t , donde C es la concentración de desinfectante y t el tiempo requerido para inactivar cierto porcentaje de la población bajo condiciones específicas de pH y temperatura. Y esta efectividad puede validarse mediante la Ecuación 2.11.

$$\frac{C}{t} = aC^b(pH^c)(T^d) \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Donde:

C= concentración de desinfectante

t= tiempo requerido para matar el 99% de los organismos seleccionados

T= Temperatura

"a" "b" "c" = constantes del ajuste del polinomio

Se ha encontrado que el producto concentración*tiempo (C^*t) es un método conveniente y útil para juzgar la eficiencia de una acción de desinfección contra un microorganismo en particular, o para estipular las condiciones importantes para la desinfección del agua. En 1980, el Comité de Agua Potable Segura seleccionó los valores de C^*t como método de comparación de la eficacia biocida, Tabla 2.6. Estos valores se utilizan ampliamente para evaluar las eficiencias relativas de diferentes

desinfectantes y para expresar la diferente resistencia de cada tipo de organismo. En la práctica la concentración (C) suele reportarse en unidades de miligramos por litro (mg/L) y el tiempo (t) en minutos (Ellis, 1991).

Tabla 2. 6. Valores de C*t para el 99% de Inactivación de Organismos Patógenos. Tomado de (Ellis, 1991)

ORGANISMO	DESINFECTANTE	TEMPERATURA (°C)	pH (unidades de pH)	VALOR C*t (mg*min/L)
<i>E. coli</i>	Cloro libre	5	6	0.045
<i>E. coli</i>	Cloro libre	5	10	0.84
<i>E. coli</i>	Cloro libre	23	7	0.014
<i>E. coli</i>	Cloramina	5	7	22
<i>E. coli</i>	Cloramina	5	9	113
<i>E. coli</i>	Dióxido de cloro	20	6.5	0.17
<i>E. coli</i>	Ozono	12	7	0.002
<i>Poliovirus 1</i>	Cloro libre	20	6	0.5-0.7
<i>Poliovirus 2</i>	Cloramina	25	9	216
<i>Poliovirus 3</i>	Dióxido de cloro	25	7	0.9
<i>Poliovirus 4</i>	Ozono	20	7	0.05
<i>Giardia lamblia</i>	Cloro libre	5	8	110
<i>G. muris</i>	Cloramina	15	7	848
<i>G. muris</i>	Dióxido de cloro	25	7	5.3

Dado que la detección del 100% de muestra no es realista, es normal determinar un producto C*t para un porcentaje específico de inactivación como 99 o 99.9%, este producto tiende a aumentar con el pH y varía inversamente con la temperatura del agua (Ellis, 1991).

2.5 Plantas Potabilizadoras (PP) en México

Los avances nacionales en materia de potabilización de agua son de gran trascendencia al constituir el derecho humano al agua adoptado en el país como derecho constitucional y derivado de la declaración de la ONU que estableció: "El derecho humano al agua potable y el saneamiento,

esenciales para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos” (CONAGUA, 2018).

De acuerdo con CONAGUA, (2017), una planta potabilizadora (PP) se puede definir como un complejo que se encarga de someter el agua superficial o subterránea de un río, o de cualquier otro embalse, a varios procesos con la finalidad de garantizar que sea apta para su consumo y uso en las actividades de la población.

En México, al cierre de 2018, se tiene un registro de 965 PP en operación con una capacidad instalada conjunta de 144 835 L/s y un caudal potabilizado de 110 252.2 L/s. No obstante, el registro de 2017 a 2018 mostró un aumento del canal potabilizado de 44 726.82 L/s (CONAGUA, 2018).

De todas estas PP, 48 pertenecen a la CDMX y en conjunto cuentan con una capacidad de instalación de 4 919 L/s y un caudal potabilizado 3 774 L/s (76% con respecto a la capacidad instalada), cuyos procesos de potabilización se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2. 7. Procesos de potabilización de las PP de la CDMX. Adaptado de CONAGUA (2018)

PROCESO	Nº DE PP EN LAS QUE EXISTE	CAUDAL POTABILIZADO (L/s)
Adsorción	1	40
Clarificación Convencional	2	410
Filtración Directa	24	2123
Ósmosis Inversa	20	1196
Otro	1	5
Total	48	3774

Los distintos procesos y operaciones primarias, secundarias y terciarias que interactúan en cada PP en operación, son parte esencial para el aseguramiento de la calidad requerida de agua potable y es deseable cubrir la demanda que la población requiere, asegurando la ausencia de patógenos que puedan ser perjudiciales a la salud humana.

Para ello se busca el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994 mediante la ejecución de análisis y pruebas en laboratorios que se esperaba se encontrarán en cada PP en operación, no obstante, resulta alto el costo de llevar a cabo la revisión completa de los parámetros establecidos en dicha normatividad y el único parámetro que vigilan en exceso es la concentración de cloro libre residual, cuya aplicación, muchas veces es sobresaturada ya que no se conoce una concentración exacta aplicada en un tiempo específico.

2.6 Caso de estudio Plantas Potabilizadoras (PP) Río Magdalena 1 y 2

2.6.1 Generalidades del Río Magdalena

La cuenca del Río Magdalena (RM) se localiza en la Sierra de las Cruces al suroeste de la CDMX y en parte de la Región Hidrológica Administrativa XVIII “Valle de México”. Comprende las alcaldías Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa (Aziz Pico & Ortega Flores, 2020), Figura 2.4.

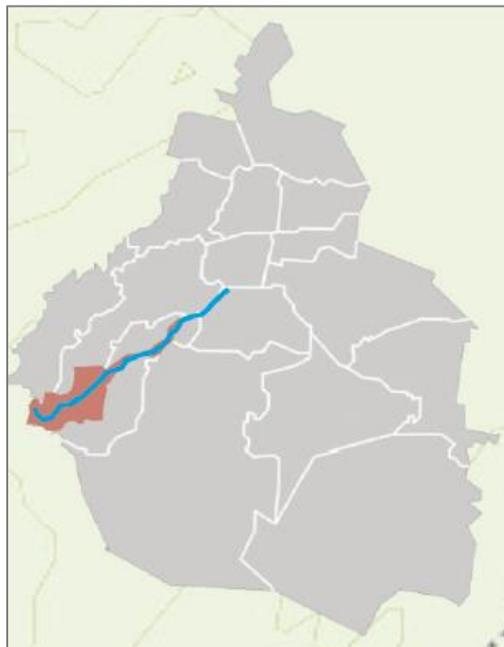


Figura 2. 4. Ubicación geográfica de la cuenca del río Magdalena y las alcaldías que la comprenden dentro de la CDMX. Tomada de (Monsivais Montoliu, 2014)

El RM, nace en las estribaciones de los cerros Palma, San Miguel, Cochinos y Coconetla, entre los más importantes, con una elevación aproximada de 3 650 metros sobre el nivel del mar (m s n m.), Figura 2.5 fue uno de los ríos más largos y caudalosos que abasteció de agua a los actuales viveros de Coyoacán, de ahí alimentaba las corrientes del río Churubusco, actualmente un colector en la avenida del mismo nombre (Legorreta, 2006).

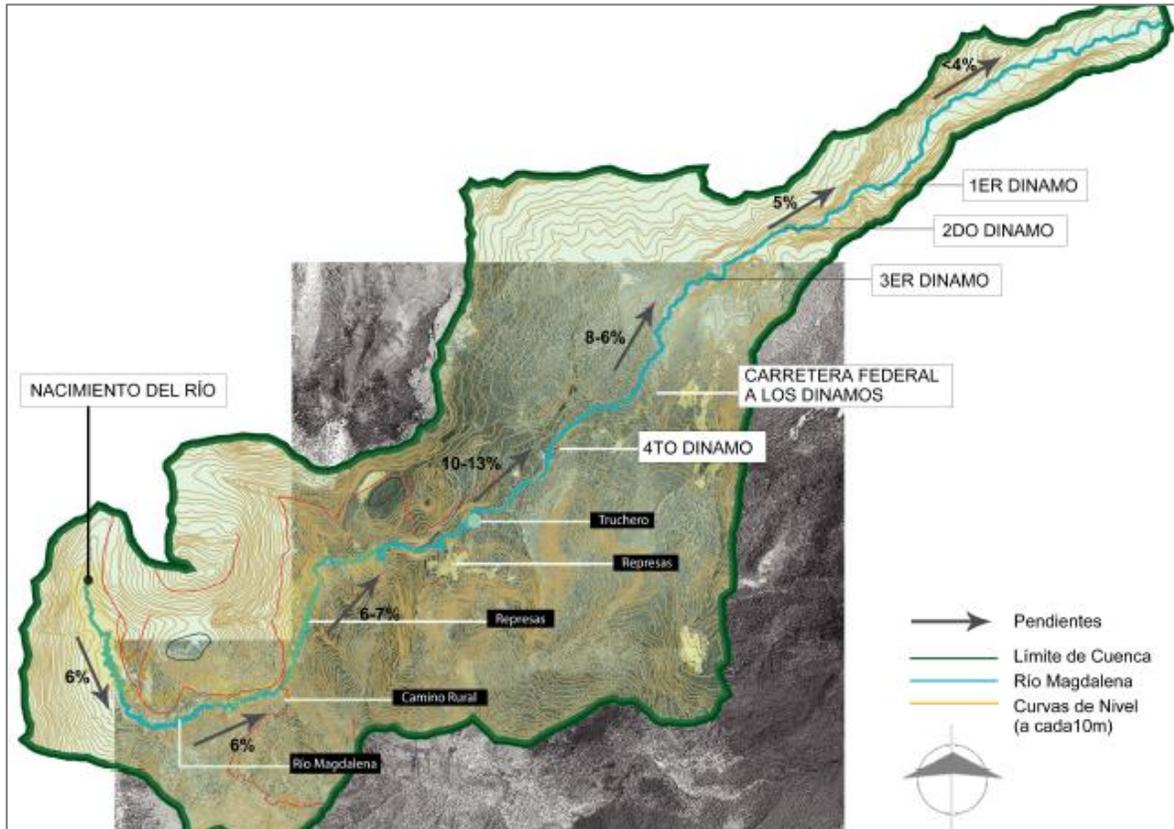


Figura 2. 5. Topografía de la microcuenca del río Magdalena. Tomado de (Monsivais Montoliu, 2014) y adaptado de (UNAM, et al., 2008)

La microcuenca posee 3 520.63 ha, en la que viven alrededor de 107 294 hab. Sus 28.2 km se distribuyen sobre áreas verdes boscosas en las que se puede encontrar agua cristalina, resaltado los llamados “Cuatro Dinamos” hasta llegar a su incorporación al drenaje (Legorreta, 2006). Dicho cuerpo de agua se divide en dos zonas; el área natural correspondiente a la conservación del suelo que involucra 14.8 km (52.5%) y el área urbana, también llamada zona baja, que posee 13.4 km (47.5%), de los cuales, 8.8 km corren a cielo abierto y 4.6 km han sido entubados. (Monsivais Montoliu, 2014) La cuál no aporta ningún efecto positivo, ya que la calidad

del agua en la parte alta es muy variable en comparación con esta zona pues, existe aporte de descarga de aguas residuales domésticas debido al turismo poco regulado (González Reynoso, et al., 2010).

Se contempla un caudal promedio de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ con una estimación en temporada de lluvias de hasta $20 \text{ m}^3/\text{s}$, dado el caudal que presenta, dos PP son encargadas de potabilizar una parte, la PP 1 Magdalena Contreras y la PP 2 Río Magdalena (UNAM, 2009).

En otro orden de ideas, es conocido que la infraestructura de abastecimiento de agua potable en la CDMX está formada por dos sistemas, Lerma y Cutzamala, el primero fue construido en los años 40, y a finales de los 70 y 90 (en un sistema multietapas), respectivamente. Mismos que bombean el 8 y 21 % del abastecimiento de agua total de la ciudad. Dicha cobertura es transportada desde más de 200 km de distancia y bombeada para su elevación más de 1000 m (Monsivais Montoliu, 2014).

Todo lo anterior, implica un gran gasto de dinero en la aportación de agua, aumentando a ello la gestión y el mantenimiento la infraestructura. Es importante entonces la búsqueda de alternativas y oportunidades en cuanto a gestión hídrica. De acuerdo con Legorreta (2009), pese a las modificaciones urbanas que ha tenido la microcuenca de río Magdalena, existe agua de este recurso natural que podría ser bien aprovechada, de tal forma que fue concebido un Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable del Río Magdalena (PMMIASRM). México, Distrito Federal, resumido en la Figura 2.6.

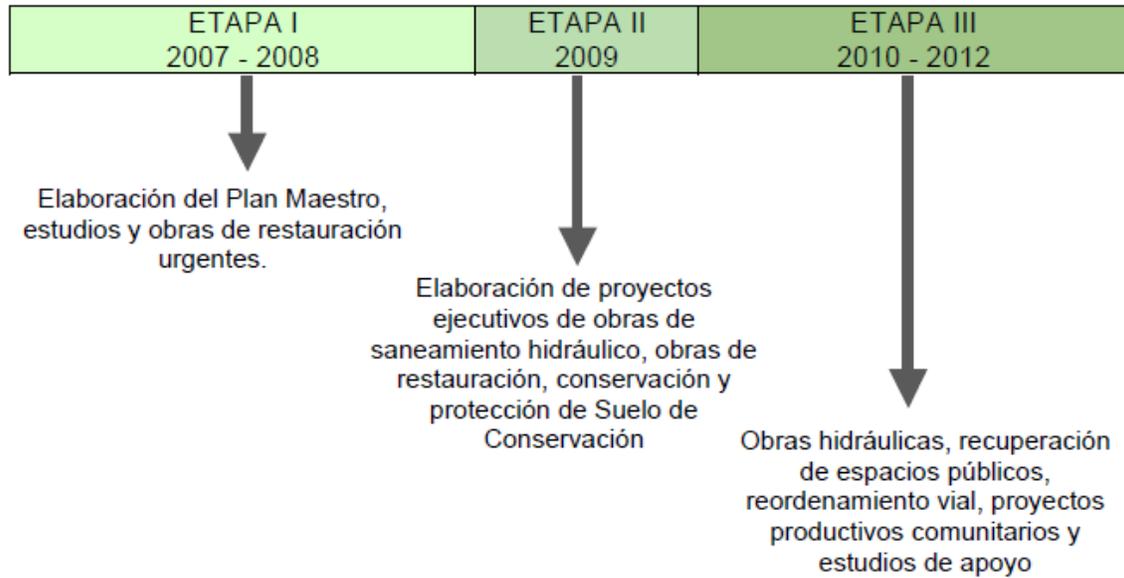


Figura 2. 6. Etapas de desarrollo de Plan de Rescate. Tomado de (Monsivais Montoliu, 2014) y adaptado de (UNAM, *et al.*, 2008).

2.6.2 Generalidades sobre la PP Río Magdalena 1

La Planta Potabilizadora Río Magdalena 1 (PPRM1) comenzó su operación el 3 de mayo de 1979 con una capacidad instalada y gasto potabilizado de 210 L/s (CONAGUA, 2018), se manejó una inversión inicial de \$ 6 955 000.00 MXN y un costo de operación de \$ 1.27 MXN/m³ para el beneficio de 180 000 hab (Campos López, 2015).

La PP se ubica entre los 19°14'30" longitud norte y los 99°17'30" longitud oeste en la CDMX (Legorreta, 2009), con una antigüedad de 42 años, se alimenta con el agua cruda conducida por el río Magdalena, el agua es captada con un mecanismo de compuertas, dicho caudal es cuantificado con un medidor tipo Venturi, este sistema cuenta con un pretratamiento a base de rejillas metálicas que impiden el paso de sólidos grandes al proceso y un desarenador de concreto que corresponde a la sedimentación de partículas discretas presentes en el agua para posteriormente ser canalizadas por gravedad a través de tubería subterránea de acero al carbón de 16" de diámetro.

Inicialmente la PPRM1 operaba de forma automatizada y contaba con un laboratorio de calidad del agua, pero éste dejó de operar cuando el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) decidió centralizar el control de calidad en su Laboratorio Central. Se han realizado cambios en

la infraestructura civil de la PP, como es el caso del levantamiento de una barda perimetral en el área de captación. De igual forma, se han atendido problema de mantenimiento como reparación de fugas, bombas, sistema de iluminación y aplicación de pintura corrosiva. La PPRM cuenta con un sistema de bombeo distribuido de la siguiente manera, Tabla 2.8.

Tabla 2. 8. Distribución del sistema de bombeo PP Río Magdalena

PROCESO	CANTIDAD	CAPACIDAD (hP)
Retrolavado	2	15
Dosificación de químicos	2	5
Servicios propios*	2	3

*Sanitarios, laboratorios, etc...

Además, se pueden encontrar cuartos de almacenamiento y dosificación de reactivos químicos, sala de operación, cuarto de bombas y galería de tubos, oficinas, pasillos laboratorio, sanitarios y áreas verdes.

2.6.2.1 Distribución de los procesos y operaciones unitarios (POU)

La captación de agua pretratada es conducida a un canal Parshall que cuenta con canal de demasías conectado a la red de drenaje. Dentro del canal se realiza una oxidación a base de hipoclorito de sodio (NaClO), sin embargo, cuando el agua se observa muy turbia y muy cercano a este punto se lleva a cabo la dosificación de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), también llamada cal hidratada o sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como medio floculante.

Posteriormente el gasto se distribuye hacia dos módulos de floculadores, seguido de dos cámaras de sedimentación. Los sólidos sedimentados son drenados a un colector de lodos conectado al drenaje.

El agua clarificada es enviada y distribuida equitativamente en un tren de cuatro filtros rápidos de flujo ascendente abiertos a la atmósfera, de 4 m de profundidad total con 1.20 m de empaque de grava-arena sílica-antracita. El agua de retrolavado de filtros es enviada al colector de lodos

que conecta con el drenaje de la ciudad y el agua filtrada es drenada por gravedad a un canal de distribución donde se realiza la desinfección con hipoclorito de sodio.

Finalmente, el efluente es entubado y enviado al sistema de distribución de agua potable para abastecer a solo una parte de la colonia Magdalena Contreras. Las unidades de potabilización descritas en los párrafos anteriores son mostradas en la Figura 2.7.

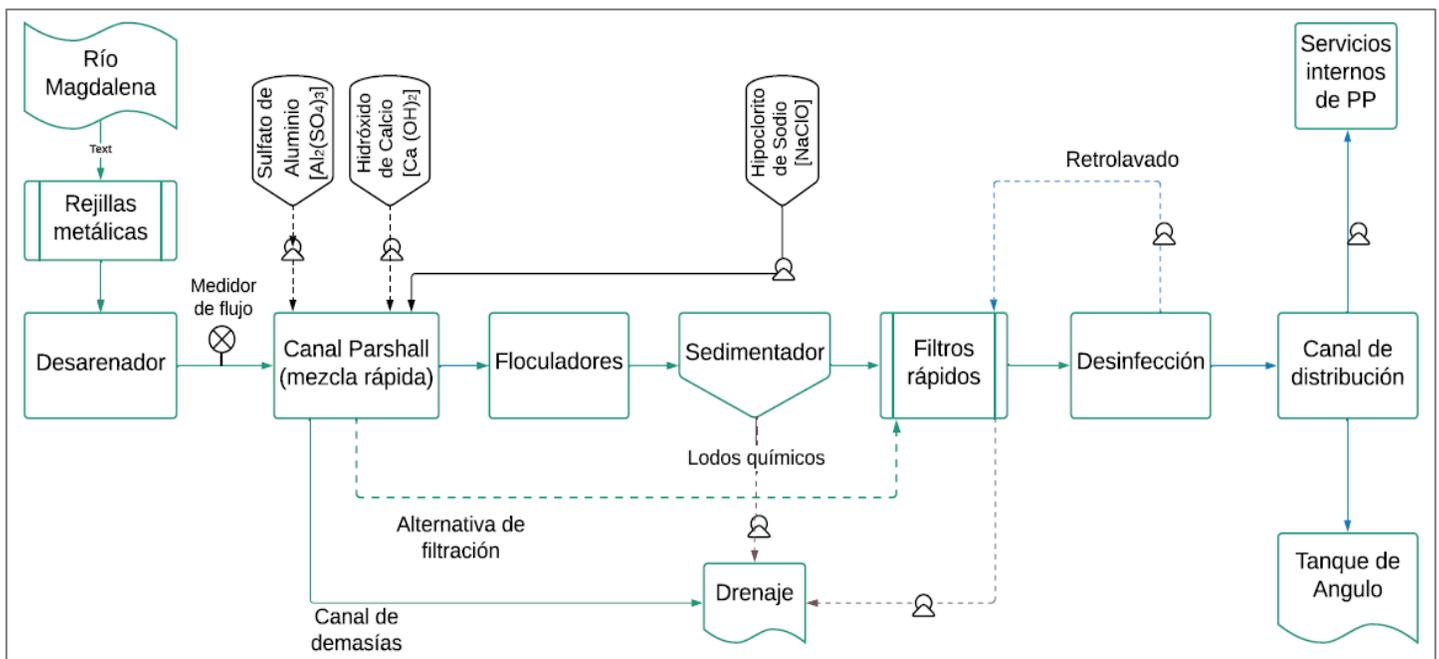


Figura 2. 7. Diagrama de Flujo de Proceso de la PPRM1

2.6.2.2 Calidad histórica del Influyente y Efluente de la PPRM1

La disponibilidad del agua también obedece a que ésta sea de calidad aceptable para un uso específico, la calidad se define como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas del agua, estas son evaluadas a través de la medición de sus parámetros (APHA, 2005) obteniéndose valores numéricos que indican el estado actual del agua analizada y su uso potencial (Almeida Lereño, et al., 2018). De tal manera que, en las siguientes Figuras, se presentan algunos parámetros correspondientes a la calidad histórica de la PPRM1, basados en los parámetros contemplados

en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, cuyos Límites Máximos Permisibles (LMP) son indicados en cada Figura, cuanto estos existen.

La Figura 2.8 muestra los valores reportados para el año 2018 en algunos parámetros convencionales dentro de la normatividad mexicana, los cuales no muestran alguna violación dentro de los LMP especificados ni antes de la entrada de la PP ni a su salida. Los valores de turbiedad, pH, cloruros, magnesio y potasio, permanecen constantes tanto en Influyente (Inf), como en Efluente (Efl), lo cual da indicio que los procesos de potabilización contemplados en la PPRM1, no tienen efecto de remoción de ellos. Por su parte, los parámetros sulfatos, calcio y sodio aumentan a la salida de la PPRM1, normativamente dichos aumentos no presentan importancia en la calidad del agua que va al

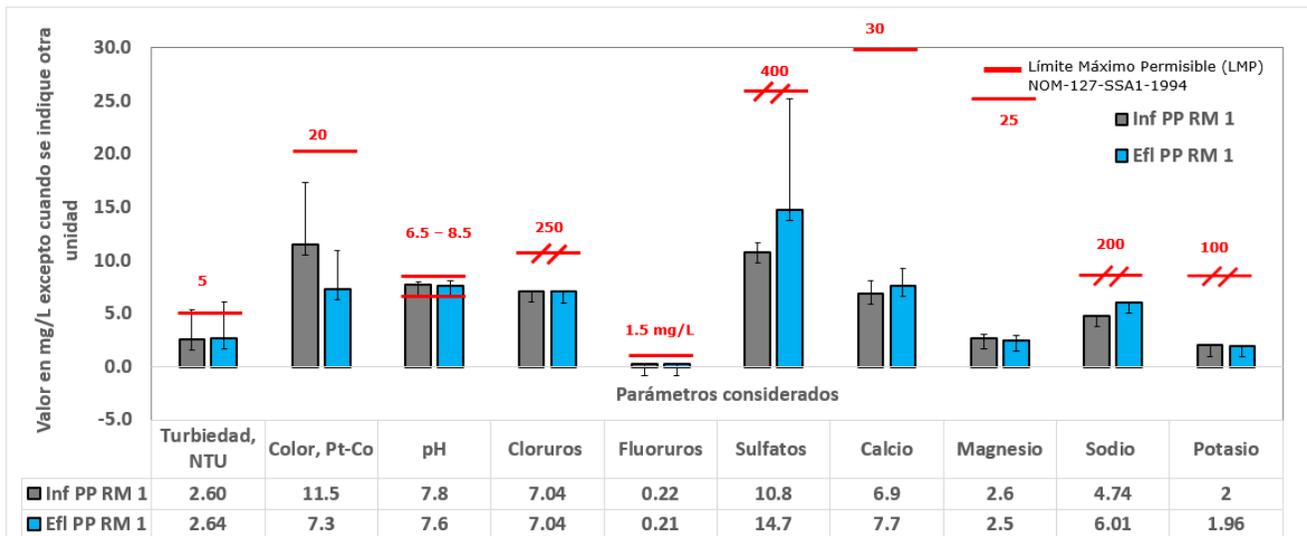


Figura 2. 8. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 30 mg/L o unidades.

En el siguiente grupo de parámetros únicamente se encuentran establecidos los LMP para los parámetros Dureza Total y Coliformes, con respecto al primero, el aumento de la concentración (mg/L) no rebasa lo LMP de la normatividad mexicana, pero sí se relaciona con respecto al incremento de Calcio mostrado en la Figura 2.9.

En lo que respecta a la cuantificación de Coliformes Fecales (CF) y Coliformes Totales (CT), los valores obtenidos no se encuentran dentro de los LMP dictados por la NOM-127-SSA1-1994 en cuanto al influente, sin

embargo, se observa un buen trabajo de desinfección al mostrar ausencia en ambos parámetros en el efluente.

La concentración en el Inf de 100 UFC/100 mL en CT pareciera preocupante al cuantificar este parámetro, sin embargo, el interés particular se dirige a los CF con la presencia de 1 UFC/100 mL, que es un grupo de bacterias que indica la calidad microbiológica del agua y la posible presencia de patógenas, por ser indicador de contaminación fecal considerado en las leyes y normas mexicanas.

Finalmente es importante mencionar, que la conductividad eléctrica ayuda a establecer los sitios de entrada de agua de diferente calidad, aproximándose a una medida de 1 000 S/cm, conductividad característica de agua de menor calidad (APHA, 2005), para este caso, el valor en la salida de la PPRM no está cerca de rebasar esta estandarización, lo que indica que el agua es de calidad aceptable para el consumo humano, con respecto a este parámetro.

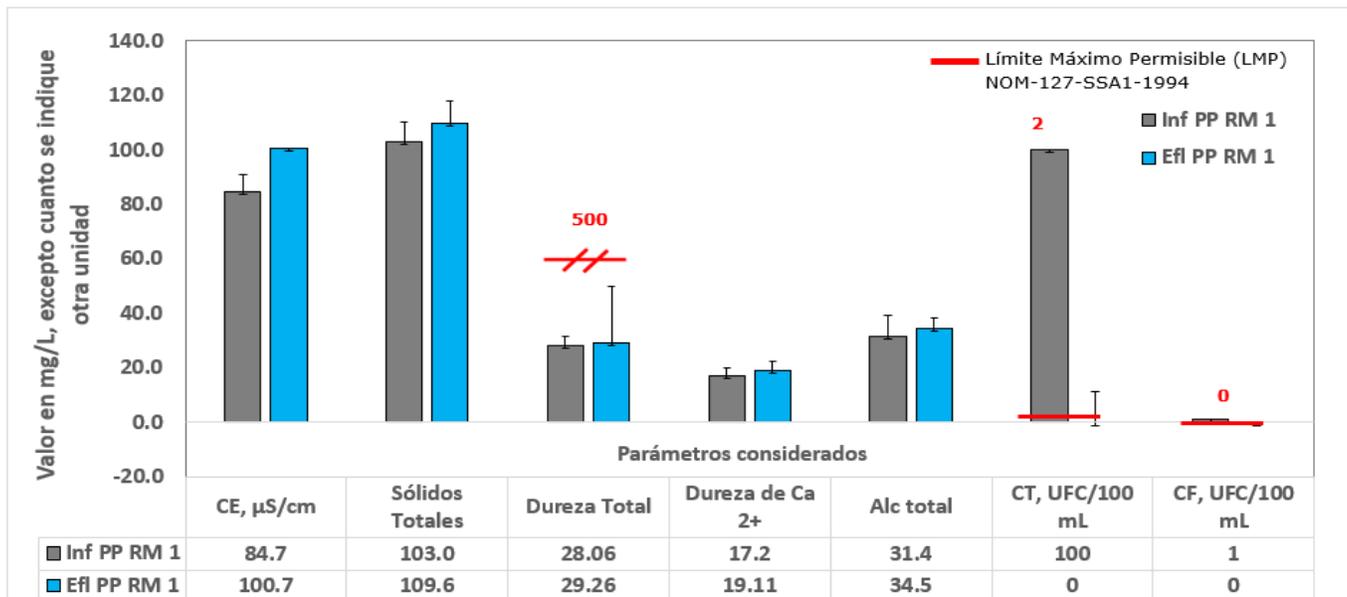


Figura 2. 9. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 140 mg/L o unidades

También se cuenta con la calidad histórica de algunos metales regulados por la NOM-127-SSA1-1994, dentro de este grupo, se observa en la Figura 2.10 que no se rebasan dichos LMP establecidos dentro de esta normatividad para ambos puntos de muestreo.

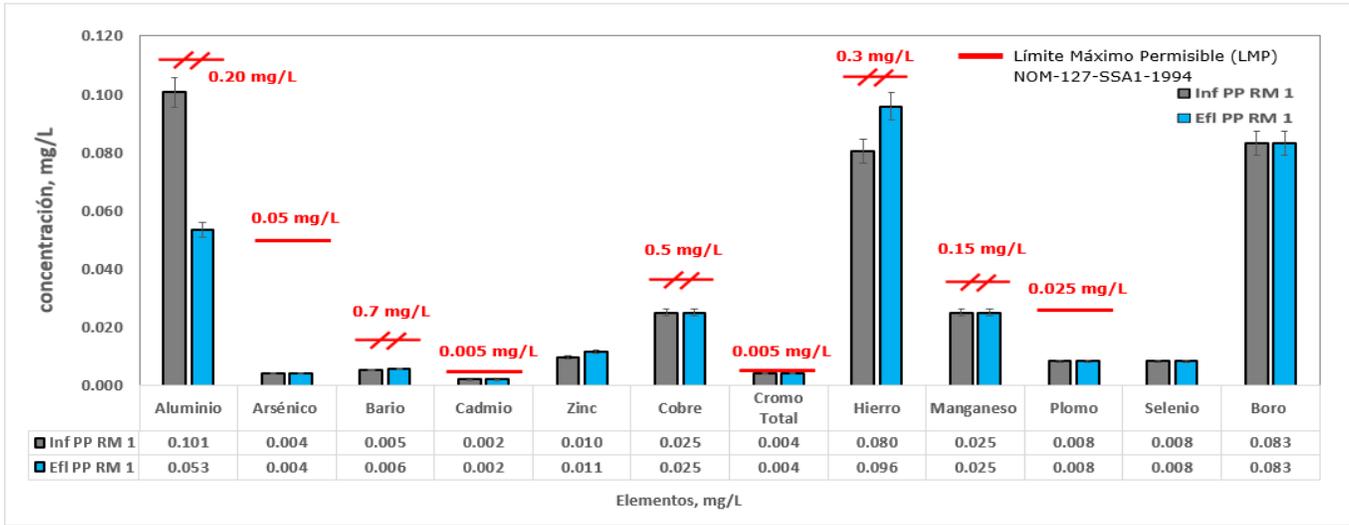


Figura 2. 10. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.12 mg/L o unidades

Finalmente, la Figura 2.11, muestra los valores obtenidos en la cuantificación de nitrógeno en sus diferentes compuestos y de Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), cuyos valores centrados en la normatividad de México, indican que las concentraciones encontradas en estos parámetros no representan un peligro potencial a la salud humana al consumir el agua de dicha fuente. Lo anterior se observa en influente y efluente de la PPRM1.

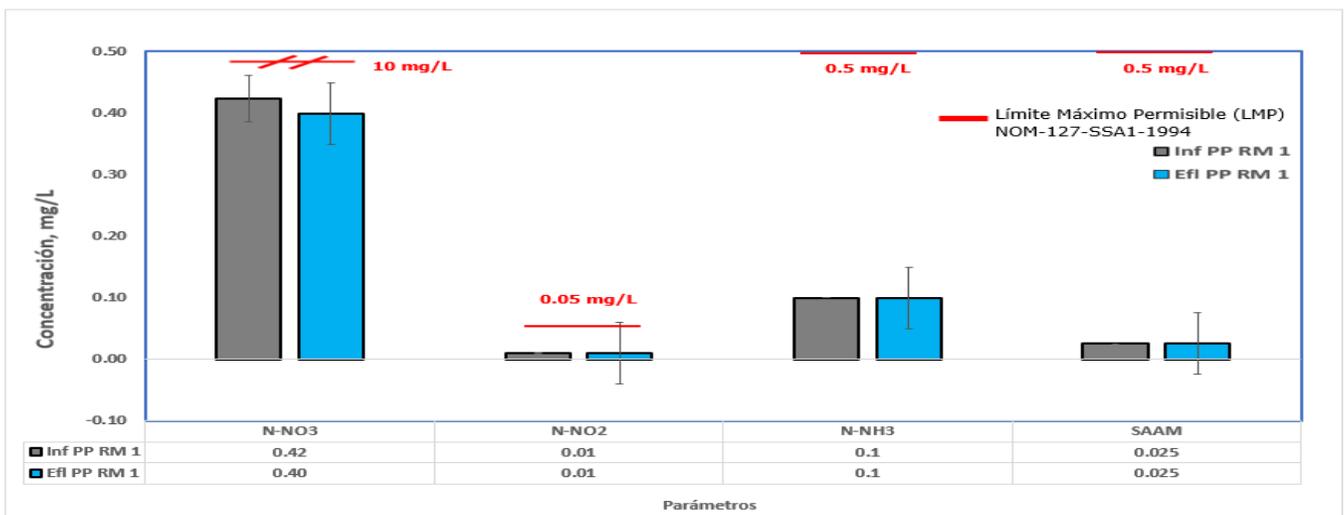


Figura 2. 11. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.5 mg/L o unidades

2.6.3 Generalidades sobre la PP Río Magdalena 2

La Planta Potabilizadora Río Magdalena 2 (PPRM2) o también conocida como “La Cañada”, tiene como ubicación geográfica 19°18'00.6" longitud norte y 99°15'1.9" longitud oeste dentro de la Ciudad de México (CDMX). Comenzó su operación el 13 de abril de 2009 y fue diseñada para trabajar de manera automática, sin embargo, desde sus inicios, en diversas ocasiones ha presentado problemas que impiden su funcionamiento automático en su totalidad. Se conoce que, en la actualidad, la PPRM2 trabaja de forma manual y potabiliza 150 L/s aunque su capacidad de diseño es de 200 L/s. El caudal potabilizado es enviado a un tanque Reynaco el cual se encarga de abastecer a parte de la población de la alcaldía Magdalena Contreras.

2.6.3.1 Distribución de los procesos y operaciones unitarios (POU)

El proceso de potabilización inicia con la obra de toma o captación del caudal del río Magdalena como el influente, dicha captación es conducida a los sedimentadores de alta tasa donde las partículas sedimentan por colisión con las paredes del de este. El efluente de los sedimentadores se conduce por una tubería hacia un cárcamo de agua cruda con capacidad de 216 m³, aproximadamente, y se envían 107 L/s como máximo hacia un tren de filtración, integrado por 12 filtros de alta presión con lecho de antracita-arena-gravilla-grava, de los cuales solo 10 funcionan y operan ocho, quedando dos en *stand by*. El retrolavado se realiza una vez por turno con agua potabilizada tomada del cárcamo de desinfección, sitio donde el agua filtrada es conducida y desinfectada con Na₂S₂O₃ mediante un dosificador de cloro que suministra 2 mg/L, consumiendo una cantidad de 700 a 800 L por semana, Figura 2.12.

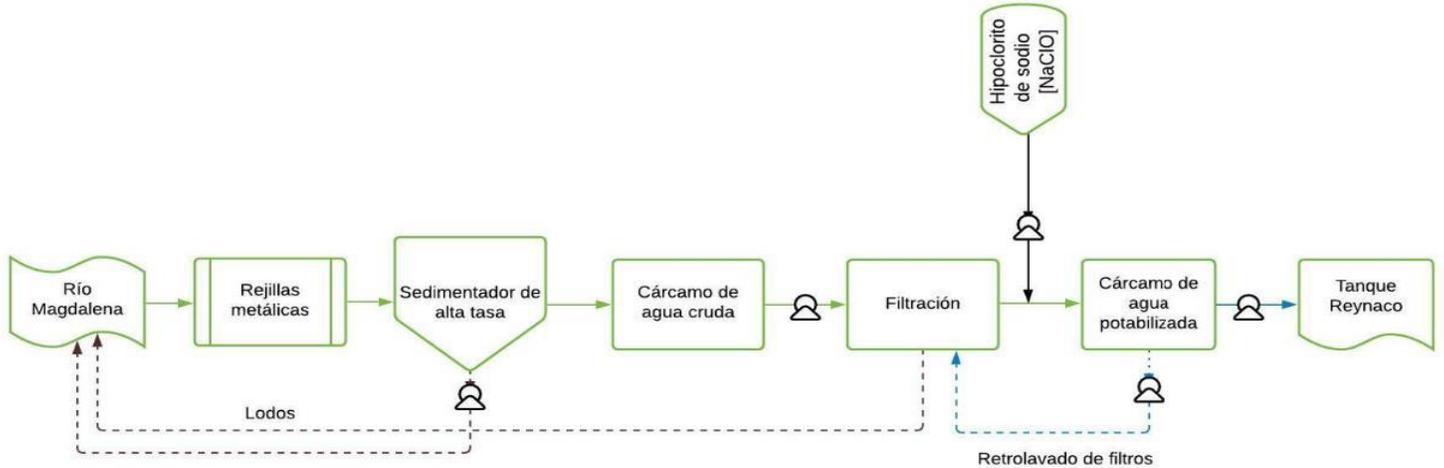


Figura 2.12. Diagrama de Flujo de Proceso de la PPRM2

2.6.3.2 Calidad histórica del Influyente y Efluente de la PPRM2

Como se abordó en la PPRM1, la calidad de entrada y salida del agua en un proceso de potabilización es relevante para conocer si es seguro el uso y consumo humano de esta, para el caso de la PPRM2 también se cuentan con datos históricos que abarcan el periodo de muestreo del año 2018 al año 2019, en los datos mostrados en la Figura 2.13 se aprecia que ninguno de los parámetros mostrados, rebasan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la norma oficial NOM-127-SSA1-19994.

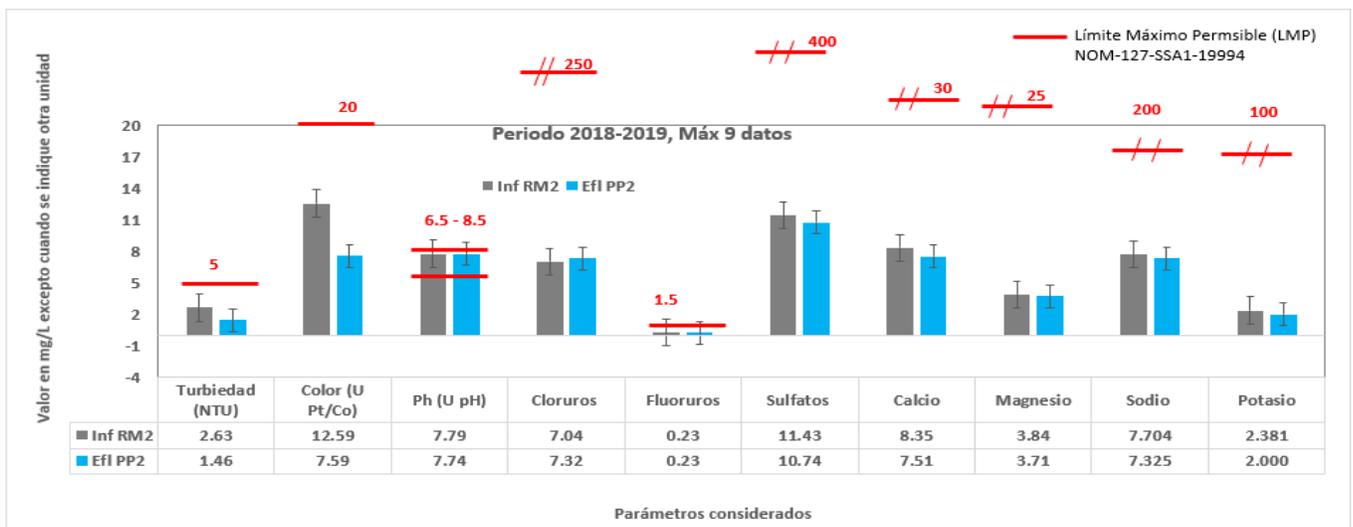


Figura 2.13. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 14 mg/L o unidades

Por otro lado, de la Figura 2.14 se destaca la calidad microbiológica de entrada y salida de la PPRM2, cuantificada mediante el uso de Coliformes totales y fecales como organismos indicadores, los cuales no representan ningún peligro en el consumo humano del agua ya que, no rebasan los LMP establecidos en la normatividad mexicana de agua potable.

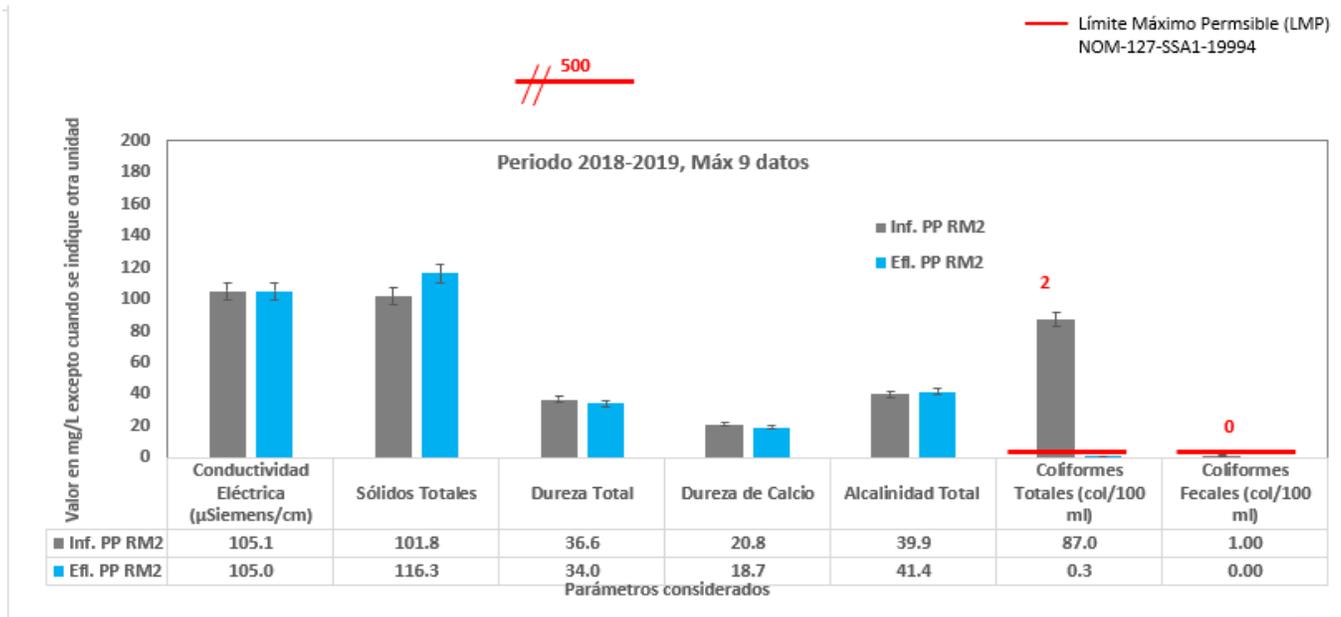


Figura 2.14. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 120 mg/L o unidades.

Con respecto a metales pesados, se encuentra la Figura 2.15 de la cual, se presta atención especial en el Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) cuyos valores para influente y efluente se encuentran muy cerca de los LMP, y con el Cromo (Cr), cuyos valores de entrada y salida de la PPRM2, se localizan justo en el límite de los establecimientos normativos. Para los tres casos, no se presenta algún porcentaje de remoción en la concentración en el agua de entrada, con respecto al efluente potabilizado. El resto de los metales, no rebasan los límites máximos permitidos en la NOM-127-SSA1-1994.

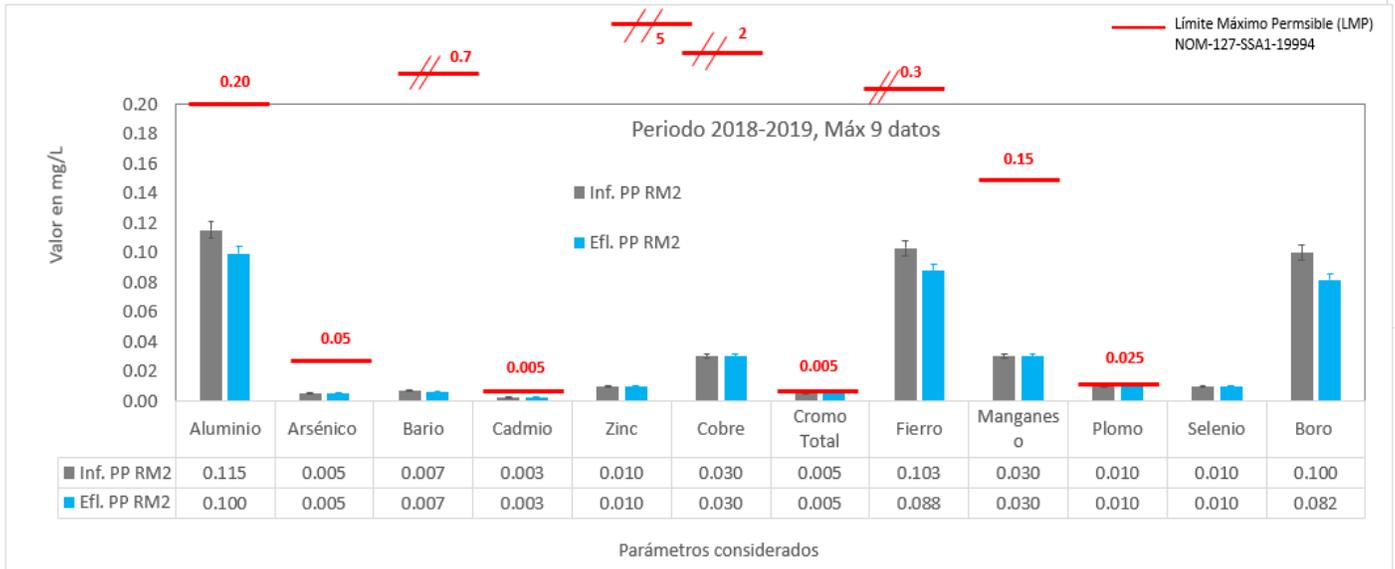


Figura 2. 15. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.12 mg/L o unidades

Por último, en la Figura 2.16 se presentan los datos obtenidos de la medición de nitrógeno en sus diferentes compuestos, donde el único parámetro que rebasa los LMP es Nitritos, también se muestran los valores reportados por las Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), que no representa ninguna violación a los límites de este parámetro, ni del resto, sin embargo, es destacable la poca o nula remoción de estas sustancias.

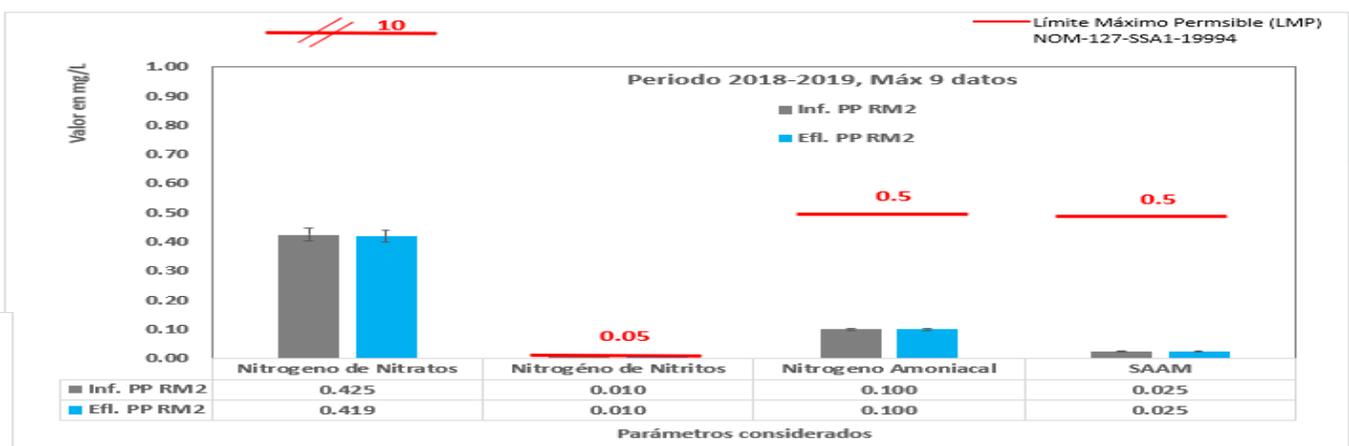


Figura 2. 16. Calidad histórica de parámetros cuyos valores medidos ascienden a 0.5 mg/L o unidades

De manera general y de acuerdo con los valores reportados en cada parámetro evaluado de las PPRM 1 y 2, el agua del río Magdalena es de

buena calidad, incluso utilizable para el consumo humano sin potabilización, en cuanto a la contaminación microbiológica, parámetro de gran importancia en el agua de consumo humano, se infiere que es mixta, esto es que proviene de origen animal como humano (Almeida Lereño, et al., 2018), sin embargo, el sistema de desinfección implementado en la planta cumple con el aseguramiento en la ausencia de patógenos como coliformes fecales.

Dentro de todos estos parámetros, no se tiene conocimiento del reporte de la cantidad de cloro aportada en el sistema de potabilización, sea cloro residual o total, se tiene conocimiento de la normatividad, que se debe cuidar el valor de 0.2 a 1.5 mg/L para considerar un aseguramiento en la desinfección del agua en la red de distribución de tal forma que, llegue a la población sin representar algún riesgo de contaminación patógena en su camino.

La desinfección ocupa una parte primordial para garantizar la calidad del agua, y dicha desinfección no sólo debe preverse a la salida de la PP, por el contrario, debe proporcionarse hasta el lugar de destino final, los usuarios que esperan el abastecimiento de este recurso.

Por otro lado, todos estos valores reportados, son producto del promedio de una serie de valores monitoreados, cuyas fechas de cuantificación no se tiene conocimiento de que sean frecuentes ni constantes, estos valores arrojan una idea sobre el estado de funcionamiento de la PP, pero es necesario analizar los valores máximos y mínimos reportados en temporadas importantes (estiaje – lluvia) de tal forma que se actualicen dichos datos de calidad y sirvan como referente para el desarrollo de esta investigación con relación al potencial de óxido reducción, como propuesta de monitoreo en el sistema de desinfección.

2.7 Situación de agua potable con relación al SARS-CoV- 2, virus causante de la COVID-19

Proporcionar condiciones seguras en materia de agua, saneamiento e higiene es esencial para prevenir brotes infecciosos y para proteger la salud humana en caso de que se produzcan, como en el caso de la enfermedad por coronavirus de 2019 (COVID-19). Estudios recientes han

encontrado fragmentos de ARN en aguas residuales, aunque no con capacidad infectiva, por su lado, los conocimientos y las investigaciones realizadas hasta la fecha no dan indicación alguna de que el SARS-CoV-2 pueda persistir en el agua potable (OMS, 2020).

Sin embargo, existe un caso documentado en donde se detectaron fragmentos de ARN de SARS-CoV-2 en un río, durante el pico de la epidemia, en el norte de Italia. Se sospecha que al río se vertían directamente aguas residuales no tratadas (OMS, 2020). Es importante dar a conocer que no se han detectado otros coronavirus en aguas superficiales ni subterráneas, por lo que el riesgo de presencia de coronavirus en los suministros de agua puede considerarse bajo (OMS, 2017).

En un estudio se halló que otros coronavirus humanos³ sobreviven dos días en agua del grifo no clorada a 20 °C. Se ha demostrado que otros coronavirus humanos son sensibles a la cloración y la desinfección con luz ultravioleta (Lai, et al., 2005) (Darnell, et al., 2004). Para lograr una desinfección centralizada eficaz, la concentración residual de cloro libre debe ser de al menos 0.5 mg/L tras un mínimo de 30 minutos de contacto con un pH inferior a 8.0 (OMS, 2017). En medio de la actual pandemia, se ha utilizado ampliamente NaClO para frenar la transmisión del virus (Li, et al., 2022), recomendando su uso al 0.05% por el Centro Europeo para la Prevención y el Control de Enfermedades (European CDC, 2020).

Dada la preocupación por la propagación de este virus, los servicios de suministro de agua no deben interrumpirse porque los consumidores no puedan hacer frente a su pago, de acuerdo con la (OMS, 2020), los gobiernos deberán dar prioridad a proporcionar acceso a estos servicios a las personas que careen de él, aplicando medidas inmediatas como pozos perforados protegidos, camiones cisterna, ampliación de las canalizaciones de suministro, entre otros, el uso de una mayor cantidad de agua se ha asociado a una menor contaminación de las manos por virus (PAHO, 2020).

De acuerdo con la OMS 2020, en lugares donde no se realiza un tratamiento centralizado del agua ni hay un suministro seguro de agua canalizada, pueden aplicarse diversas tecnologías de tratamiento del agua

³ Se valoró la inactivación del coronavirus del síndrome respiratorio agudo severo (SARS-CoV) (OMS, 2020).

doméstica que resultan eficaces para eliminar o destruir los virus, tales como la ebullición, el uso de filtros ultrafiltrantes o de nanomembranas de alto rendimiento, la exposición a la radiación con luz ultravioleta (UV) y el uso de dosis adecuadas de productos de cloro, como el hipoclorito de sodio.

En los medios de desinfección mencionados, se ha mostrado su efectividad en cuanto a la destrucción de la cápside que acompaña a estos virus provocando una afectación e impedimento en su replicación debido al daño, sin embargo, las diversas tecnologías requieren de diversos análisis para asegurar la inactivación, destrucción o ausencia de estos patógenos, además de la capacitación necesaria al personal encargado para tener un buen control para brindar agua segura al consumo humano.

Debido a todo el plan de trabajo que conlleva preparar un buen manejo de los parámetros involucrados en la desinfección del agua potable, se sugiere abordar tecnologías que no requieran de toda esta capacitación para que los operadores se desempeñen de la mejor manera y cuya facilidad en su aplicación sea clave para controlar la desinfección en tiempo real y con un margen de error mínimo, tal como se propone el uso del potencial óxido reducción en esta investigación, el empleo de un electrodo que permita identificar el agua libre de organismos dañinos a la salud humana.

3 METODOLOGÍA

El seguimiento metodológico actualmente comprende cuatro etapas mostradas en la Figura 2.12 y descritas a continuación:

Etapla 1. Proceso de toma de muestras: Esta sección se dió paso a una serie de visitas a los puntos de estudio y al proceso de toma de muestras y se determinan disposiciones necesarias para llevar a cabo la selección de los puntos exactos de muestreo, comprende información sobre el sitio de estudio, relacionada con las condiciones de operación de las PP seleccionadas.

Etapla 2. Pruebas experimentales en el laboratorio: Abarcó el estudio experimental de las condiciones establecidas de trabajo, los puntos de partida y la creación de un estándar de referencia que permite mejorar las condiciones en la desinfección simulada de las plantas potabilizadoras (PP) y establecer la actividad de los parámetros requeridos durante la desinfección. De igual forma, se realizó un estudio del comportamiento que tienen los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos durante la potabilización del agua de entrada a las PP.

Etapla 3. Desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras: Se dio a conocer la selección de parámetros considerados como importantes en la desinfección, también se establecieron condiciones fijas de trabajo (dosificaciones y tiempo de contacto fijos) para llevar a cabo la desinfección en las PP de interés.

Etapla 4. Cinéticas de desinfección: Finalmente, se planteó un nuevo desarrollo experimental que se centró en la variación del tiempo con respecto a cada dosificación establecida de desinfectante para cada PP, lo que permitirá evaluar la actividad microbiana al paso del tiempo. Al realizar los análisis de datos necesarios, es en este punto donde se estudió la posibilidad de construir superficies de respuesta, obteniendo las condiciones que satisfagan los objetivos del trabajo.

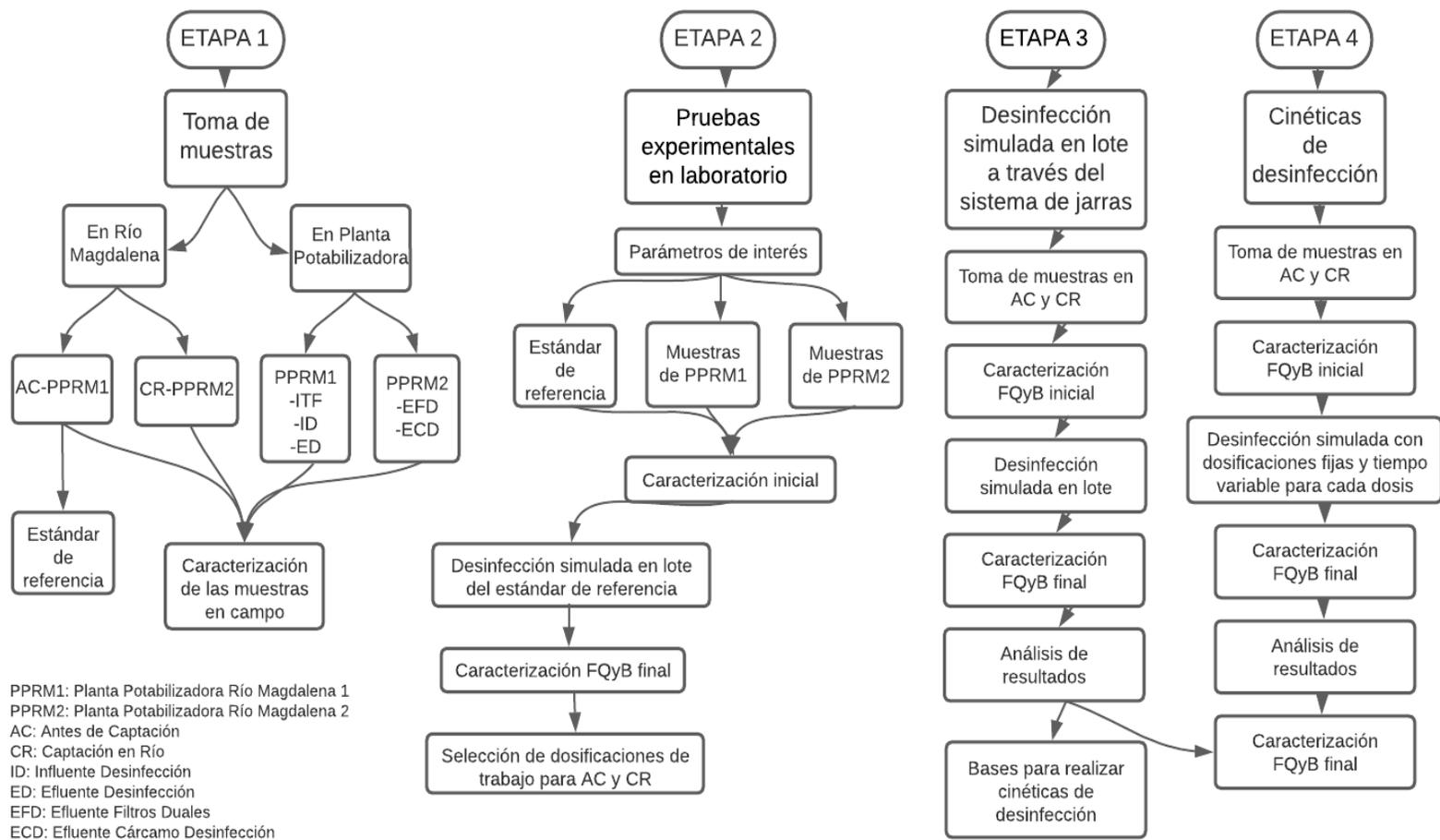


Figura 3. 1. Diagrama del desarrollo metodológico

3.1 PRIMERA ETAPA. Toma de Muestras

La toma de muestras se llevó a cabo durante la temporada de lluvia en los meses de agosto y septiembre. Para el primer mes, se realizó un muestreo el día jueves 19 de agosto idealmente de doce horas, cuyo comienzo y término fueron a las 7:00 y 19:00 horas, respectivamente. Dicho trabajo consistió en tomar volúmenes iguales de agua en diferidos horarios en el día y al final de este, combinar dichos volúmenes para generar una muestra compuesta, esto para el caso de las zonas previas a la captación de las plantas potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2.

En los mismos horarios, se tomaron muestras puntuales en operaciones y sistemas unitarios clave dentro de las PP, y dichas muestras fueron analizadas en campo empleando parámetros como Potencial de Hidrógeno(pH), Conductividad Eléctrica (CE), Temperatura, Oxígeno Disuelto (OD), Potencial Óxido Reducción (ORP), Color Aparente y Verdadero, Cloro Total y Residual. Esta planeación en la toma de muestras es significativa al abarcar los escenarios posibles presentes a lo largo del día en cuanto a calidad de agua en tiempo de lluvia. Cabe aclarar, que debido a la actual pandemia que se atraviesa, donde las condiciones no permiten realizar actividades con total libertad, no fue posible realizar los experimentos para la época de estiaje.

Todos los sitios de muestreo realizados se muestran en la Figura 3.2., y se incluyen los puntos Antes Captación (AC), Influyente Tanque Floculación (ITF), Influyente Desinfección (ID) y Efluente Desinfección (ED) para PPRM1, así como Captación Río (CR), Efluente Filtros Duales (EFD) y Efluente Cárcamo Desinfección (ECD) para la PPRM2, los cuales se detallarán en las



Figura 3. 2. Mapa de puntos de muestreo para la Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2

Conociendo la calidad de agua en sitios de estudio durante el muestreo compuesto, se plantearon dos muestreos puntuales en los puntos previos al sistema de captación, ocurridos los días 07 de septiembre y 13 de septiembre, un muestreo por cada PP y cuya toma fue a las 10:00 horas.

Para todos los casos, dichas muestras se colectaron en envases de polietileno, previamente lavados con agua desionizada, cuyas características obedecen a un pH de 5 a 8 unidades, conductividad de 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y resistividad de 0.2 $\text{M}\Omega\text{cm}$ a 25 °C, en ningún parámetro fisicoquímico fue necesario emplear un método de conservación especial, ya que estos se determinaron de forma inmediata en instalaciones del laboratorio. Por su parte, para los parámetros microbiológicos, la toma de muestra fue en bolsas estándar con capacidad de 100 mL y provistas con 10 mg de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$).

Las muestras tomadas se conservaron a una temperatura de 4°C hasta ser trasladadas al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA), ubicado en las instalaciones del Instituto de Ingeniería, Edificio 5.

3.1.1 Planta Potabilizadora Río Magdalena 1

Se conoce que la PPRM1 opera con dos trenes de tratamiento de acuerdo con la calidad fisicoquímica de entrada, en las temporadas de lluvia y estiaje, y que además sin importar el tren de tratamiento que se encuentre

en operación, siempre se llega a un punto bien establecido, que es el paso del agua en potabilización a través de un sistema de filtros rápidos seguido de una desinfección y finalmente el agua se conduce hacia el sistema de distribución.

En el estudio experimental, se busca que la procedencia de las muestras tenga un efecto significativo de acuerdo a su origen en la PP, y este origen muestre el cambio de calidad microbiológica desde la entrada hasta un paso antes del sistema de desinfección, y a la salida del sistema de desinfección. De tal forma que se establecieron los siguientes puntos de muestreo, descritos a continuación.

3.1.1.1 Antes de Captación (AC)

Contiene la calidad fisicoquímica y microbiológica que entra a la PPRM1 antes de ser sometida al sistema de potabilización y sirvió como punto de partida para el estudio. Se conoce la existencia de las actividades comerciales y recreativas que se encuentran aguas arriba del río (en el parque los dinamos), durante la que se emiten descargas que llegan a este punto, Figura 3.3.



Figura 3. 3. Sitio de la toma de muestra en AC

Durante el muestreo de agosto, muestras compuestas, se colectó un volumen total de 60 L, tomándose 20 L cada 4 horas y al final del día,

realizar la mezcla de esta muestra. Esta mezcla, corresponde al estándar de referencia, el cuál más tarde será caracterizado y sometido a pruebas preliminares en laboratorio, de las que se conservaron o descartaron algunos parámetros de medición, así como el número de dosificaciones de trabajo con el desinfectante.

Con respecto a la muestra puntual, llevada a cabo en el mes de septiembre, únicamente se colectaron 20 L como volumen total en este punto, dado que con el estándar de referencia se obtuvieron las dosificaciones deseadas para su estudio.

Para ambos muestreos, se colectaron 100 mL de muestra en bolsas estándar para la detección de Coliformes Totales y *E. coli*.

3.1.1.2 Influyente Tanque Floculación (ITF)

Este punto es importante por ser el proceso inmediato a la oxidación con NaClO, la cual como ya se conoce, se lleva a cabo en el canal Parshall del tren de potabilización. De esta etapa, se requirió conocer la calidad microbiológica principalmente, y saber con certeza el decaimiento de los organismos control seleccionados, sin descartar los parámetros fisicoquímicos y su variación con respecto a la oxidación.

De tal forma que se, tomó un litro de muestra en el influente de los tanques floculadores, en diferentes horarios, así como, un volumen de muestra de 100 mL para la detección microbiológica, Figura 3.4. En este caso no se llevó a cabo el muestreo puntual en el mes de septiembre, ya que con el muestreo en el mes de agosto se pretendió abordar la calidad dentro de la PP, debido a la limitación de permisos por la situación que aún se atraviesa, la pandemia.



Figura 3. 4. Sitio de toma de muestra en ITF

3.1.1.3 Influyente Desinfección (ID)

Como parte del estudio propone mejorar el control en el sistema de desinfección mediante el ORP, fue necesario conocer la calidad microbiológica con respecto a Coliformes y *E.coli*, que contiene el agua que resta después de pasar por los procesos y operaciones unitarias, y con la que el sistema de desinfección estará trabajando. También, se requieren análisis para la calidad fisicoquímica para abordar la eficiencia de remoción del tren de potabilización hasta este punto, en comparación con su entrada de agua.

Para este punto, en el muestreo de agosto durante tres horarios sucedidos a lo largo del día se recabó un volumen total de un litro para análisis fisicoquímicos y 100 mL para análisis microbiológicos. De igual forma que en el caso anterior, no fue posible llevar a cabo muestreo puntual en el mes de septiembre Figura 3.5.



Figura 3. 5. Sitio de la toma de muestra en ID

3.1.1.4 Efluente Desinfección (ED)

Finalmente, la siguiente toma de muestra fue el punto en el que el agua sale con una determinada concentración de cloro residual libre (CRL), la cual, se espera que mantenga la inactivación o destrucción de los organismos patógenos en el agua que será distribuida a los consumidores, Figura 3.3. Esta toma de muestra nos indicó si esta concentración de CLR está dentro de los límites máximos permisibles (LMP) de la NOM-127-SSA1-1994, y que son adecuados para no causar daños a la salud humana. También se buscó conocer si existe la posibilidad de la presencia de organismos Coliformes y *E. coli*, después de todo el proceso de potabilización, así como la eficiencia de remoción con la que cuentan los sistemas de la PPRM1, de los parámetros que son de interés en el estudio.

Al igual que en los casos anteriores, sólo se llevó a cabo la toma de tres muestras puntuales colectando un volumen de un litro para determinar los parámetros fisicoquímicos y 100 mL para microbiológicos en el mes de agosto, de este punto no se llevó a cabo el muestreo en el mes de septiembre, Figura 3.6.



Figura 3. 6. Sitio de la toma de muestra en ED

3.1.2 Planta Potabilizadora Río Magdalena 2

A diferencia de la PPRM1, la Planta Potabilizadora Río Magdalena 2 (PPRM2) opera con un tren de potabilización bien establecido durante todo el año, sin embargo, coincide con la PPRM1 con un proceso específico y el más importante, la desinfección. Y de la misma forma, cada punto de muestreo seleccionado busca ser relevante dentro del estudio. De tal forma que, se establecieron los siguientes puntos.

3.1.2.1 Captación Río (CR)

Importante para conocer la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua en la entrada del proceso de potabilización, de tal forma que, también se llevó a cabo un muestreo compuesto en el mes de agosto y durante el mismo día que en el caso de la PPRM1. Como se sabe, en este muestreo se valoró la calidad fisicoquímica de algunos parámetros ya mencionados, lo que permitió establecer la similitud de calidad con respecto al punto AC en la PPRM1, y decidir que no se requería un estándar de referencia para este caso de estudio, ya que es comparable con el primer estándar de referencia propuesto.

Únicamente se colectó un litro de muestra compuesta para continuar con la determinación de parámetros fisicoquímicos y 100 mL para los microbiológicos en tres distintos horarios a lo largo del día de muestreo correspondiente al mes de agosto, Figura 3.7.



Figura 3. 7. Sitio de la toma de muestra en CR

3.1.2.2 Efluente Filtros Duales (EFD)

Como se sabe, en el PP no se cuenta con un amplio tren de potabilización para el agua de entrada, ni con una oxidación previa antes del paso de la desinfección, de tal forma que, la salida del agua al término del proceso de filtración, es considerada como la última etapa previa a la desinfección, se consideró este punto para conocer la concentración fisicoquímica removida o permanente tras la potabilización, ya que será la que llegué a los tanques de almacenamiento de agua, listos para ser distribuidos.

De este punto, se colectó un volumen de un litro para dichos análisis fisicoquímicos y 100 mL para análisis microbiológicos, de la misma forma, en tres horarios establecidos a lo largo del día durante el muestreo del mes de agosto, Figura 3.8.



Figura 3. 8. Sitio de la toma de muestra en EFD

3.1.2.3 Efluente Cárcamo Desinfección (ECD)

Finalmente, como la parte más importante del proceso, para asegurar la calidad apta para uso y consumo humano, durante los mismos horarios

establecidos a lo largo del día en el muestreo del mes de agosto, se tomó un volumen de muestra de un litro y 100 mL para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, respectivamente en el efluente de cárcamo de desinfección, Figura 3.9.



Figura 3. 9. Sitio de la toma de muestra en ECD

3.2 SEGUNDA ETAPA. Corridas Experimentales en Laboratorio

3.2.1 Parámetros de interés durante el monitoreo

Mediante la información recabada acerca de la curva típicamente obtenida durante la adición de cloro, se determinaron los parámetros donde su monitoreo es importante en cada fase que transcurre en esta curva de cloración al punto de quiebre, así como algunos otros que son de interés en la calidad física del agua. De tal forma que se consideran los parámetros descritos en la Tabla 3.1, en la cual, se han dividido en diversos

grupos de acuerdo con las características que comparten y su importancia dentro del estudio.

Tabla 3. 1. Justificación de los parámetros de interés seleccionados en la investigación

GRUPO	PARÁMETRO	UNIDADES	JUSTIFICACIÓN
1	Potencial Óxido Reducción (ORP)	mV	Como parámetro principal debido al objetivo del tema de investigación, es necesario estar midiendo la cantidad de energía presente en los diversos estudios experimentales que se lleven a cabo.
2	Hierro	mg/L	Al entrar en contacto el cloro con el medio a desinfectar, lo primero que ocurre es una oxidación de materia inorgánica, principalmente Fe, Mn y Sulfatos.
	Manganeso	mg/L	
3	Absorbancia UV _{254nm}	cm ⁻¹	Lo siguiente dentro de este contacto desinfectante-medio, a un tiempo determinado, es la oxidación de materia orgánica (MO) en la que se lleva a cabo su degradación hasta el punto de su destrucción. Dentro de algunos parámetros conocidos para avalar la presencia de MO en muestras de agua, son los mostrados en este grupo.
	Carbón Orgánico Total (COT)	mg/L	
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	
4	Cloro Libre Residual y Total	mg/L	Una vez que el desinfectante ha finalizado la oxidación de las especies de materia inorgánica y orgánica presentes, se da paso a la desinfección. Los organismos de interés analítico son los establecidos dentro de los objetivos de este trabajo.
	Coliformes Totales	UFC/100 mL	
	<i>Escherichia Coli</i>	UFC/100 mL	
5	Color Aparente y Verdadero	U Pt/Co	Parámetros físicos como percepción visual, interfieren con el medio desinfectante. En la materia disuelta orgánica, compuestos como aminoácidos y proteínas tienden a formar complejos con capacidad nula desinfectante.
	Sólidos Disueltos, Suspendidos y Totales (SDT, SST, ST)	mg/L	
	Turbiedad	NTU	
6	Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	Debido a la dosificación de Cloro y el tiempo de contacto, el pH puede cambiar según las especies que se estén produciendo en las reacciones ocurridas durante la desinfección,
	Potencial de Hidrógeno (pH)	U pH	

		arroja una idea sobre la presencia de estas. Por su parte la alcalinidad es importante para determinar el poder amortiguador del pH
Temperatura	°C	Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la acción desinfectante del cloro.

Si bien, no son los únicos parámetros que podrían estudiarse, los seleccionados son representativos del comportamiento que se quiere analizar con respecto a la posible relación existente ORP-Cloro residual-Inactivación de organismos control. Y la inclusión de un mayor número de parámetros, significa incrementar costos y tiempo dentro del estudio, dadas las condiciones actuales que atraviesas por un periodo de pandemia, no se sabe con certeza con cuanto tiempo extra se cuenta para completarlo, es mejor delimitarlo.

Con respecto a las técnicas y métodos a emplear, en la Tabla 3.2, se aborda una recopilación sobre estas en cada parámetro seleccionado.

Tabla 3. 2. Técnicas y métodos analíticos usados

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO	TÉCNICA
Absorbancia UV _{254nm}	cm ⁻¹	Espectrofotometría	Compuestos Orgánicos Absorbentes de UV, APHA (5910)
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	Volumetría	NMX-AA-036-SCFI-2001
Carbón Orgánico Total (COT)	mg/L	Digestión	Digestión de Reactor, HACH (10129)
Cloro Libre Residual y Total	mg/L	Colorimetría	DPD, HACH (8021) Y (10070)
Color Aparente y Verdadero	U Pt/Co	Colorimetría	NMX-AA-045-SCFI-2000
Hierro	mg/L	Colorimetría	FerroVer, HACH (8008)
Manganeso	mg/L	Colorimetría	PAN, HACH (8149)
Potencial Óxido Reducción (ORP)	mV	Potenciométrica	Waterproof Pocket ORP Tester
Potencial de Hidrógeno (pH)	U pH	Potenciométrica	NMX-A-008-SCFI-2016
Sólidos Disueltos, Suspendidos y Totales (SDT, SST, ST)	mg/L	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2015
Temperatura	°C	Potenciométrico	NMX-AA-007-SCFI-2013

Turbiedad	NTU	Turbidimetría	NMX-AA-038-SCFI-2001
Coliformes Totales	UFC/100 mL	Colorimetría	SimPlate® Total Plate Count
<i>Escherichia Coli</i>	UFC/100 mL	Colorimetría	SimPlate® Total Plate Count

De entre todos estos parámetros, algunos fueron medidos en el sitio de estudio propio, aumentando el nivel de confiabilidad en los resultados obtenidos, al ser tiempo real de medición, Figura 3.10, por su parte, aquellos restantes fueron determinados una vez que las muestras llegaron a las instalaciones del LIA.



Figura 3. 10. Laboratorio improvisado dentro de las instalaciones de la Planta Potabilizadora Río Magdalena 1 para la medición de parámetros de campo

3.2.2 Estándar de Referencia

Para trabajar con el estándar de referencia, se tomó la muestra compuesta proveniente del punto Antes de Captación (AC) en el río, PPRM1, cuyo volumen fue de 60 L recabados, Figura 3.11. Este estándar, tiene como objeto determinar la calidad promedio presente del agua que se trata en la PP, y los requerimientos para llevar a cabo la desinfección mediante el uso del ORP, para lo cual se analizaron los parámetros que tienen interacción con la desinfección. También se establecieron las condiciones necesarias para llevar a cabo la simulación de la desinfección en el laboratorio.



Figura 3. 11. Muestra compuesta, cuyo volumen corresponde a 20 L de capacidad

3.2.2.1 Caracterización inicial

Para el estándar de referencia, su caracterización inicial consistió en tomar la muestra compuesta antes mencionada, y llevar a cabo la medición de los parámetros Potencial Óxido Reducción, Cloro Total, Cloro Residual, pH, Absorbancia UV_{254nm} , Coliformes Totales, *E. coli*, Nitratos, Alcalinidad, Manganeso y Hierro, Figura 3.12. No se analizaron el resto de los parámetros para la construcción de la curva al punto quiebre, pero sí se tuvo interés en ver su comportamiento al transcurso de la desinfección conforme la dosis de $NaClO$ se fue añadiendo.



Figura 3. 12. Medición de algunos parámetros al estándar de referencia para su caracterización inicial, previa a las pruebas de desinfección

3.2.2.2 Prueba preliminar de desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras

Para realizar esta prueba experimental, fue necesario establecer y conocer las condiciones de trabajo, que delimitaran y aseguraran observar el comportamiento de la desinfección con NaClO en el agua cruda tomada del río. De acuerdo con la bibliografía consultada, se encontraron las siguientes condiciones típicas de cloración dentro de una PP, Tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Valores reportados de control de desinfección en PP. Tomado de CONAGUA (2019)

PARÁMETRO	VALOR SUGERIDO	UNIDADES
Concentración de cloro industrial NaClO	10-12	%
Cloro residual en agua potable	0.2-1.5	mg/L

Dosis de cloro aplicadas en plantas NaClO	0.2-2	mg/L
Tiempo de contacto de cloro NaClO	15-30	min

De estas condiciones, se definieron las condiciones de operación en las que, se analizará el comportamiento que tenían los parámetros de interés descritos en la Tabla 3.1, abarcando en la medida de lo posible, los valores mínimos y máximos de operación durante la desinfección con cloro, empleando HClO como agente desinfectante. Se buscó estudiar el momento en el que se llega al punto de quiebre y como este punto influye sobre los organismos patógenos de interés, la concentración de cloro residual libre que se tiene y muy importante, el ORP que arroja este punto. No se considera un tiempo exacto u óptimo porque de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, generalmente no se cuenta con un control en las PP en México, se usa mucho el método de goteo constante que asegure la ausencia de los organismos patógenos, y dado que no se tiene este cuidado, se estima que, sin importar el tiempo de contacto, se cuente con un intervalo de ORP que permita asegurar la ausencia de estos organismos.

De tal forma que, se tomaron 24 L de muestra, depositados a su vez en vasos de precipitados con capacidad volumétrica de un litro, y se cuidó trabajar a la temperatura que se encuentra el agua del río en estado natural. Se asignó un tiempo de retención de 5 min, ya que los estudios preliminares mostraron que, usando el tiempo mínimo sugerido por CONAGUA, (2019) que es de 10 min, los microorganismos control Coliformes Totales y *E. coli*, para este caso, no presentaban alguna resistencia, por el contrario, al término del tiempo de contacto de 10 min, no se encontraba presencia de estos aun cuando se usó la dosificación mínima sugerida por la misma. Por lo tanto, se optó por trabajar con un tiempo de contacto más corto y observar de esta forma la actividad microbiana a ir incrementando las concentraciones de cloro que se depositaron en las muestras. De tal forma que se establecieron 24 dosificaciones en concentraciones crecientes y con un tiempo de contacto fijo, obteniéndose un total de cuatro pruebas realizadas en el sistema de jarras, ya que cada lote de trabajo fue de un máximo de seis vasos de precipitados, Tabla 3.4.

Tabla 3. 4. Guía de dosificaciones establecidas para la desinfección simulada en lote a través del sistema

Pruebas realizadas en el sistema de jarras	Dosificación de cloro (mg/L)	Tiempo de contacto (min)	Volumen muestra (L)	Número de muestra
Prueba 1	0.025	5	1	1
	0.05	5	1	2
	0.075	5	1	3
	0.1	5	1	4
	0.125	5	1	5
	0.15	5	1	6
Prueba 2	0.175	5	1	7
	0.2	5	1	8
	0.225	5	1	9
	0.25	5	1	10
	0.275	5	1	11
	0.3	5	1	12
Prueba 3	0.325	5	1	13
	0.35	5	1	14
	0.375	5	1	15
	0.4	5	1	16
	0.425	5	1	17
	0.45	5	1	18
Prueba 4	0.475	5	1	19
	0.5	5	1	20
	0.525	5	1	21
	0.55	5	1	22
	0.575	5	1	23
	0.6	5	1	24

Las dosificaciones propuestas fueron posibles gracias a la preparación de una dilución de cloro cuya concentración responde a 0.1 mg de cloro por cada mL tomado de la disolución, tomando como base una solución de cloro concentrada al 12%, la cual fue tomada propiamente del mismo abastecimiento con el que cuenta la PPRM1, Figura 3.13.

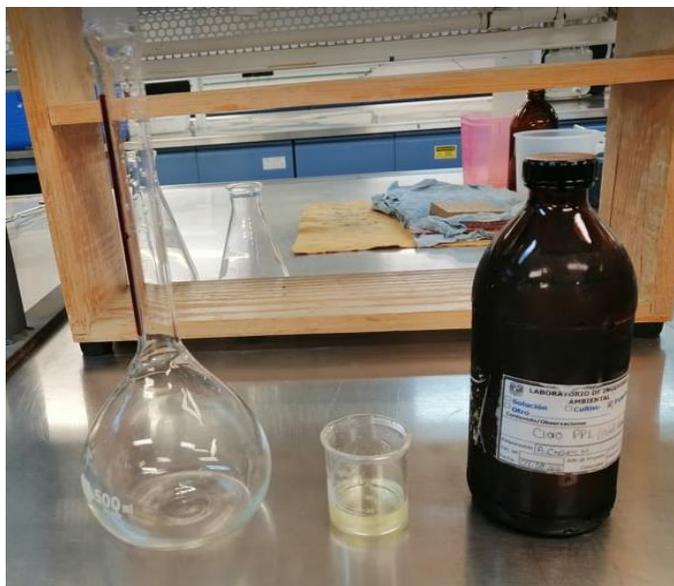


Figura 3. 13. Preparación de la disolución de NaClO

A cada vaso de precipitados con muestra se le añadió una concentración de Cloro, según correspondiera, Figura 3.14.



Figura 3. 14. Adición de Cloro como NaClO al estándar de referencia

Se dejó reaccionar durante cinco minutos, Figura 3.15.



Figura 3. 15. Reacción del Cloro con el estándar de referencia durante el tiempo de contacto de 5 minutos

Una vez transcurrido del tiempo de contacto, a cada muestra con cloro se le añadió 0.1 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ para detener la reacción de oxidación del cloro con los compuestos inorgánicos, orgánicos y con los organismos control, Figura 3.16.



Figura 3. 16. Preparación de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ para añadir al estándar de referencia con cloro, al término del tiempo de reacción

De tal forma que al término de la prueba se cuantificaron los mismos parámetros que durante la caracterización inicial previa a la prueba, Figura 3.17. Como se observa en la Tabla 3.4, este ciclo se fue retomando hasta completar las dosificaciones establecidas.

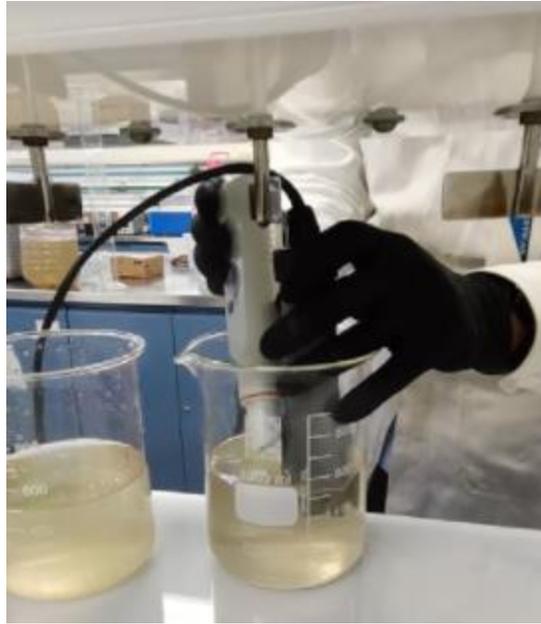


Figura 3. 17. Medición de parámetros iniciales

3.2 TERCERA ETAPA. Desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras

De la etapa dos, se obtuvo el comportamiento de los parámetros partícipes durante la desinfección, y gracias a los resultados encontrados, se determinó el seguimiento de esta desinfección simulada para otros dos muestreos en el punto Antes de Captación (AC) para la PPRM1 y en el punto Captación Río (CR) para la PPRM2, Figura 3.18, cuya caracterización y toma de muestra fue puntual. También, del estándar de referencia, fue posible establecer dosificaciones (concentraciones de cloro) de trabajo más exactas, que comprobaran el comportamiento de la desinfección mediante el punto de quiebre, sin la necesidad de requerir un mayor número de insumos para ello. De tal forma que, se muestra el seguimiento de esta etapa experimental, ocurrido en las Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2.



Figura 3. 18. Toma de muestra puntual en AC-PPRM1 (a) y CR-PPRM2 (b)

3.2.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica preliminar

Con base en los resultados obtenidos del estándar de referencia, se delimitó aún más el número de parámetros de medición durante la caracterización inicial, para estos casos, únicamente se cuantificó Potencial Óxido Reducción, Cloro Total, Cloro Libre, pH, Absorbancia UV_{254nm} , Coliformes Totales y *E. coli*. Para este caso, dichos parámetros fueron realizados en el LIA.

3.2.2 Corrida de desinfección en muestra tomada en PPRM1

Partiendo de la experiencia adquirida durante la prueba de desinfección simulada con el estándar de referencia, se optó por trabajar con un menor número de concentraciones de cloro obteniéndose el total de una prueba con 6 muestras y permaneció el tiempo de contacto de cinco minutos, Tabla 3.5.

Tabla 3. 5. Condiciones de experimentación PPRM1

Pruebas realizadas en el sistema de jarras	Dosificación de cloro	Tiempo de contacto	Volumen muestra	Número de muestra
	(mg/L)	(min)	(L)	
Prueba 1	0.025	5	1	1
	0.1	5	1	2
	0.175	5	1	3
	0.275	5	1	4
	0.4	5	1	5
	0.5	5	1	6

Se tomaron seis litros de muestra y se depositaron en vasos de precipitados con capacidad volumétrica de un litro, a cada vaso con muestra se le agregó la dosificación indicada y se dejó reaccionar durante cinco minutos, al término de este tiempo, se le añadió 0.1 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ para detener la reacción de desinfección y cuantificar los mismos parámetros usados en la caracterización inicial para este muestreo, Figura 3.19.



Figura 3. 19. Prueba de desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras para la PPRM1

3.2.3 Corrida de desinfección en muestra tomada en PPRM2

Al igual que en el caso de la PPRM1, se tomó la experiencia del estándar de referencia y se seleccionaron 12 dosificaciones a emplear durante la prueba de desinfección, obteniéndose en total dos pruebas en el sistema de jarras, el tiempo de contacto siguió permaneciendo en cinco minutos, para poder visualizar la población de organismos indicadores con el aumento de la concentración del desinfectante, Tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Condiciones de Experimentación PPRM2

Pruebas realizadas en el sistema de jarras	Dosificación de cloro (mg/L)	Tiempo de contacto (min)	Volumen muestra (L)	Número de muestra
Prueba 1	0.025	5	1	1
	0.05	5	1	2
	0.075	5	1	3
	0.1	5	1	4
	0.125	5	1	5
	0.15	5	1	6
Prueba 2	0.175	5	1	7
	0.225	5	1	8
	0.275	5	1	9
	0.35	5	1	10
	0.4	5	1	11
	0.5	5	1	12

Siguiendo la secuencia de los casos anteriores, los 12 L de muestra que fueron necesarios, se depositaron en vasos de precipitados, distribuyendo un litro en cada uno, y se les agregaron las dosificaciones de cloro indicadas, al término del tiempo de contacto, se detuvo la reacción del cloro con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y se procedió a determinar los parámetros indicados en la caracterización inicial de estas muestras puntuales, Figura 3.20.

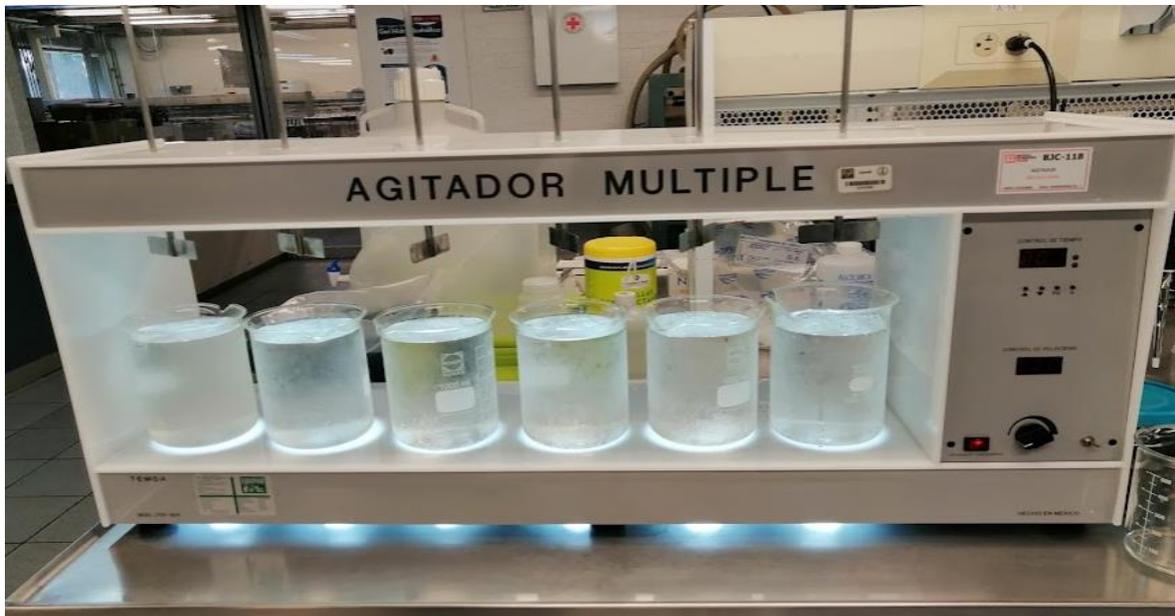


Figura 3. 20. Sitio Prueba de desinfección simulada en lote a través del sistema de jarras para la PPRM2

3.3 CUARTA ETAPA. Cinéticas de Desinfección y Recrecimiento

Para el estudio de los modelos cinéticos propuestos, se siguió la metodología experimental antes vista, la cual consistió en el uso del sistema de jarras mediante un nuevo lote de desinfección. En esta etapa experimental se tomaron como referencia los resultados obtenidos en las desinfecciones de las PP 1 y 2 con respecto a la concentración de cloro residual, ORP y ausencia de organismos control, fijando las dosificaciones de trabajo en cada caso, y variando el tiempo de contacto de 1 a 5 minutos. Se procedió a medir pH, ORP y Cloro residual, así como a determinar Coliformes Totales y *E. coli*. Las condiciones de trabajo se muestran en la Tabla #. Los resultados obtenidos de las cinéticas se deberán comparar con el ORP que se ejerce a esta velocidad de desinfección y su variación durante la ocurrencia de esta.

Tabla 3. 7. Condiciones de experimentación para construir las cinéticas de desinfección de cada PP

Pruebas realizadas en el sistema de jarras	Dosificación de cloro en PP1 y PP2 (mg/L)	Tiempo de contacto (min)	Volumen muestra (L)	Número de muestra
Prueba 1	0.025	1	1	1
		2	1	2
		3	1	3
		4	1	4
		5	1	5
Prueba 2	0.1	1	1	6
		2	1	7
		3	1	8
		4	1	9
		5	1	10
Prueba 3	0.175	1	1	11
		2	1	12
		3	1	13
		4	1	14
		5	1	15
Prueba 4	0.275	1	1	16
		2	1	17
		3	1	18
		4	1	19
		5	1	20
Prueba 5	0.4	1	1	21
		2	1	22
		3	1	23
		4	1	24
		5	1	25
Prueba 6	0.5	1	1	26
		2	1	27
		3	1	28
		4	1	29
		5	1	30

En el caso de los estudios de recrecimiento, estos se llevaron a cabo durante la temporada de lluvia, en el mes de septiembre de 2022, las condiciones de trabajo se muestran en la Tabla #, y de igual forma que en

el caso anterior, se usó el sistema de jarras para realizar la experimentación. Para fijar estas condiciones, se consideraron aquellas dosificaciones en las que los resultados obtenidos mostraron desinfección satisfactoria en cada PP, las cuales mostraron ausencia de Coliformes Totales y *E. coli* a valores de ORP superiores a 500 mV, para cada una se consideró un sistema de luz y uno de oscuridad. El volumen de trabajo para cada PP fue de 2 L y de estos se tomaron muestras de 100 mL al finalizar cada tiempo de contacto parcial, los cuales fueron crecientes comenzando en cinco minutos hasta un día. Al término de cada tiempo parcial, se realizó la medición de los parámetros ya conocidos y mencionados con anterioridad.

Tabla 3. 8. Condiciones de trabajo empleadas para llevar a cabo las pruebas de recrecimiento en la desinfección simulada de las PP

Pruebas realizadas en el sistema de jarras	Dosificación de cloro en PP1 (mg/L)	Dosificación de cloro en PP2 (mg/L)	Tiempo de contacto (min)	Volumen muestra (L)	Número de muestra
Prueba 1. Presencia de Luz	0.5	0.4	5	1	1
			10	1	2
			20	1	3
			40	1	4
			24 h	1	5
Prueba 2. Ausencia de Luz	0.5	0.4	5	1	1
			10	1	2
			20	1	3
			40	1	4
			24 h	1	5

3.4 Tratamiento de datos mediante estadística

3.4.1 Análisis de Varianza (ANOVA)

El ANOVA es una prueba estadística desarrollada para realizar simultáneamente la comparación de las medias de dos poblaciones, o más (Rubio Hurtado & Berlanga Silvete, 2012), (Juárez Lugo, 2015). El modelo comúnmente empleado se puede mostrar como:

$$y_{ij} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

y_{ij} = Observación i-ésima

μ_{ij} = Media del nivel de factor o tratamiento i-ésimo

ε_{ij} = Error aleatorio

$i= 1,2,\dots,a$

$j= 1,2,\dots,n$

En las que se plantean dos hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos estudiados, es decir, no existe variabilidad.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde:

H_0 = Hipótesis nula

μ_1 = Media del nivel de factor o tratamiento 1

μ_2 = Media del nivel de factor o tratamiento 2

Hipótesis alterna (H_1): Existen diferencias estadísticamente significativas que muestren la variabilidad entre los procesos o tratamientos estudiados.

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde:

H_0 = Hipótesis nula

μ_1 = Media del nivel de factor o tratamiento 1

μ_2 = Media del nivel de factor o tratamiento 2

En todos los casos se empleó un nivel de significación de 0.05 y un nivel de confianza del 95%, el análisis se realizó con el software Excel en donde el criterio fue; si el valor de *p value* es mayor que 0.95, entonces se rechaza (H_0) (Juárez Lugo, 2015).

3.4.1.1 *Uso del estándar de referencia construido*

Para emplear un estándar de referencia que representara la calidad del agua en el influente de ambas PP, sitios donde se buscó establecer las

condiciones de desinfección, fue necesario conocer si existía variabilidad entre ellas (H_1), o se asumía no existían diferencias estadísticamente significativas (H_0). De tal forma que de resultar H_1 , el estándar de referencia construido no tendría validez en los estudios de desinfección realizados. Por lo tanto, se realizó una prueba ANOVA de dos factores con varias muestras por grupo, en la que estas últimas representaron los parámetros de calidad de agua medidos (26 parámetros) en los influentes de las PP en el río, el análisis particular del total de los parámetros evaluados se muestra en el Anexo A2.1. Y los procesos a comprar son la PP 1 (punto AC) y 2 (punto CR) de Río Magdalena, en donde se utilizó análisis de dos factores con varias muestras por grupo.

3.4.1.2 Funcionamiento del sistema de desinfección en las PP

Para determinar la importancia que se les está dando a los sistemas de desinfección en las PP de Río Magdalena, se evaluaron los resultados de calidad obtenidos mediante la medición de aquellos parámetros que se consideraron importantes en este trabajo, se muestran en el Anexo A2.2. En el ANOVA requerido, se consideró que no existía variabilidad (H_0) en la calidad de agua de entrada (puntos AC y CR) y el agua obtenida en los sistemas de desinfección de ambas PP (puntos ED de cada PP), en contra de la hipótesis que apoya la existencia de la variabilidad entre cada influente y su respectiva desinfección (H_1), empleando en donde se utilizó análisis de dos factores con varias muestras por grupo el análisis de dos factores con varias muestras por grupo.

3.4.1.3 Efecto de la desinfección simulada sobre el agua del río Magdalena

Se realizaron los resultados experimentales obtenidos después de la desinfección, de la misma forma en la que evaluó el funcionamiento de los sistemas de desinfección en las PP, comparando los procesos: agua tomada en los puntos AC y CR y el agua sometida a dosificación con cloro. Donde la H_0 planteó que no existía variabilidad entre el antes y el después de la desinfección simulada, y en H_1 , si existían diferencias estadísticamente significativas entre los procesos, mediante el análisis de un factor.

3.4.2 Análisis de Superficie de Respuesta

Es una metodología que reúne técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y análisis de problemas en los que una variable de respuesta (y), recibe la influencia de otras (X_1, X_2), y cuyo objetivo es establecer las mejores condiciones de esa respuesta (Montgomery, 2004), mediante una gráfica que se representa con la ecuación siguiente:

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde:

y_{ij} = Observación i -ésima

μ_{ij} = Media del nivel de factor o tratamiento i -ésimo

ε_{ij} = Error aleatorio

$i= 1,2,\dots,a$

$j= 1,2,\dots,n$

En la mayoría de casos, la interacción variable de respuesta y las variables independientes es desconocida, de tal forma que el primer paso es aproximar esta relación, mediante un modelo de primer orden, Ecuación 3.3.

$$y = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n + \varepsilon \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde:

y = Variable de respuesta que busca encontrar las mejores condiciones de funcionamiento

β_1 = Coeficiente de regresión perteneciente a la variable X_1

β_2 = Coeficiente de regresión perteneciente a la variable X_2

β_n = Coeficiente de regresión perteneciente a la variable X_n

ε = Error

Y para la localización de los factores $\beta_1 \beta_2 \beta_n$, se requirió de un análisis de regresión, realizado a través del software Excel. Una vez teniendo estos valores, se construyó la gráfica esperada y procedió a su análisis.

Se fijo una variable de respuesta, como el parámetro ORP, en el que se busca establecer las mejores condiciones de trabajo, y se propusieron las siguientes hipótesis:

H₀= La variable de respuesta final, se altera de forma significativa.

H₁= La variable de respuesta final no se altera de forma significativa.

Este análisis se refirió al establecimiento de las mejores condiciones para lograr una desinfección al 100% de los coliformes totales y *E. coli*, en la que los valores de ORP fueran mayores a los iniciales antes de la dosificación y tomando en cuenta la concentración de cloro residual en la cual se manifestaran estas condiciones.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.2 Caracterización Físicoquímica y Microbiológica de los Sitios de Estudio

En esta sección se abordan los valores encontrados en la medición de algunos parámetros físicoquímicos y microbiológicos, estos son comparados con respecto a los establecimientos de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 que establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para algunos parámetros que se considera importante su cuidado para la ingesta de agua potable.

Se muestran cuatro análisis en cuanto a caracterización físicoquímica, el muestreo compuesto realizado únicamente para influentes y efluentes de la PPRM 1 y 2, el muestreo puntual realizado a tres distintos horarios del día en las operaciones y procesos unitarios de interés en la PPRM1, así como el muestreo puntual en tres distintos horarios del día en los procesos y operaciones unitarias en la PPRM2, para ambos casos se muestra calidad físicoquímica y finalmente calidad microbiológica bajo las mismas condiciones que en los dos últimos casos, tanto para la PPRM1 como la PPRM2.

El análisis de todos los parámetros físicoquímicos fue abordado en función de sus valores máximos obtenidos de tal forma que se observe de la mejor forma posible su variación entre influentes y efluentes de ambas PP.

4.1.1 Muestreo compuesto en Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2

Dentro del primer grupo de parámetros en el muestreo compuesto llevado a cabo en las PPRM 1 y 2, se presentan los parámetros Absorbancia UV_{254nm} , Cloro Residual Libre (CRL), Hierro y Nitrógeno amoniacal, Figura 4.1 de los cuáles, al CRL se le presta especial importancia al notar que rebasa los LMP en un 16.7% con respecto al valor máximo que es de 1.5 mg/L y en el muestreo se obtuvo un valor de 1.8 mg/L en el efluente de la PPRM1, estos límites son sugeridos debido a las implicaciones que podría traer a la salud humana, se presume que altas concentraciones en este parámetros implican la formación de subproductos provenientes de la

cloración y que entre sus efectos figuran el daño en las funciones reproductoras (disminución de la fertilidad y riesgo de aborto espontáneo), daños en el desarrollo fetal dentro del útero (defectos del tubo neural, bajo peso al nacer y crecimiento intrauterino retardado) y desarrollo de cáncer, sobre todo en la vejiga urinaria como lo sugiere (Olmedo Sánchez, 2008).

Con respecto a la absorbancia UV_{254nm} , al considerarse como un indicador de la materia orgánica presente en el agua ya que se considera precursor de los subproductos de la desinfección en el agua (Luque Torrez, 2018), se deseó conocer la concentración de entrada y salida de las Plantas Potabilizadoras, con respecto a la PPRM1, los valores se mantiene prácticamente constantes, sin embargo en la PPRM2, se muestra una remoción del 17.4% en su efluente con respecto al influente, y se destaca que en la PPRM1 se cuenta con un tren de tratamiento más amplio en el que las operaciones y procesos unitarios no tienen efecto significativo de remoción sobre este parámetro, sin embargo, aunque en la PPRM2 el tren de potabilización únicamente cuenta con filtros duales, es suficiente para presentar un porcentaje de remoción más alto aun cuando se cuentan con valores de entrada más bajo que en la PPRM1.

Con respecto al Hierro y Nitrógeno amoniacal como indicadores de la materia inorgánica y orgánica presentes en agua, respectivamente, no se muestran valores que pongan en riesgo el uso y consumo humano de agua de acuerdo con los establecimientos de la NOM-127-SSA1-1994.

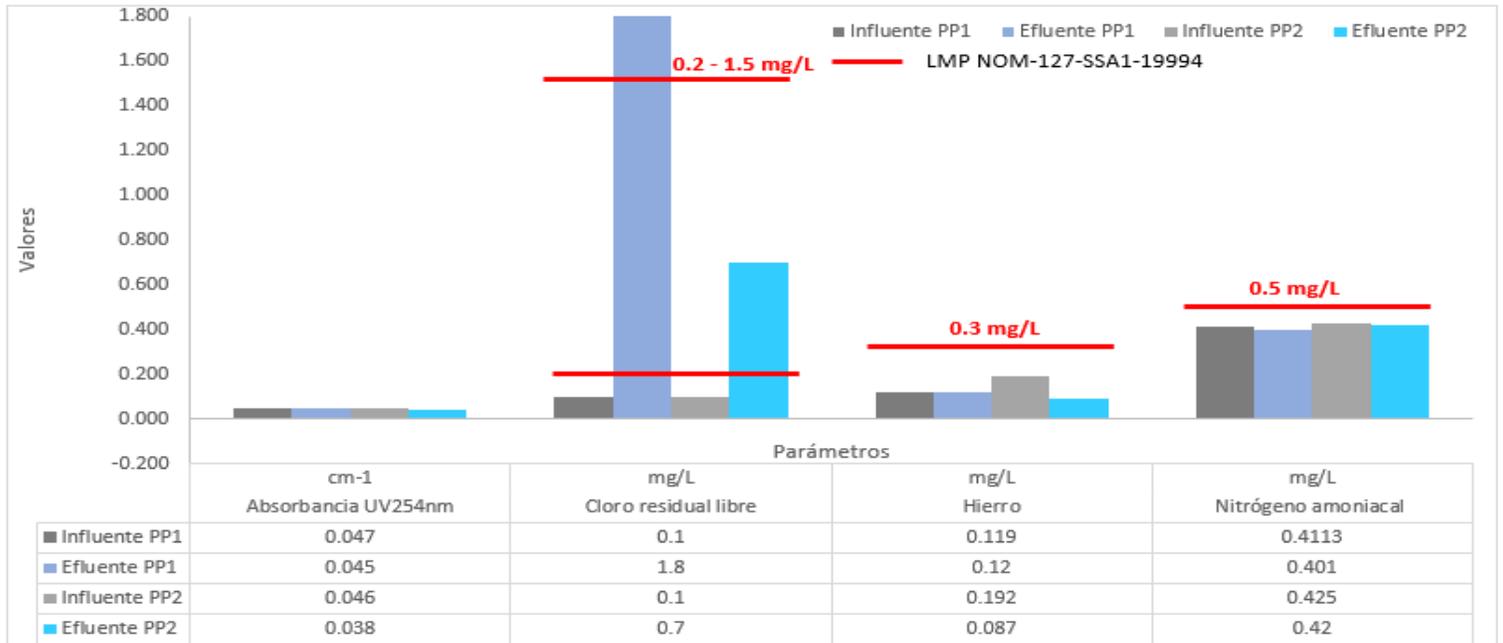


Figura 4. 1. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM 1y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 1.8 unidades

El siguiente grupo abarcó los parámetros Alcalinidad como amortiguador del pH, el cuál servirá para predecir las especies químicas presentes tras la reacción de oxidación con la incorporación de cloro a las PPRM 1y 2, de estos parámetros se observa que sus valores permanecen prácticamente constantes en los influentes y efluentes de estas PP.

Color aparente, verdadero, Sólidos Suspendidos Totales, Temperatura y Turbiedad como parámetros físicos y estéticos, de los cuales, en el color aparente sólo se presenta un valor de 3 unidades Pt-Co en el punto influente de la PPRM2 y en el resto de los puntos muestreados, cero unidades Pt-Co, por su parte en el color verdadero regulado en la NOM-127-SSA1-1994, no se muestran unidades Pt-Co presentes en los puntos muestreados, con respecto a los sólidos suspendidos a pesar de no estar normados, se muestra una remoción del 16.7% con respecto a la PPRM1 y 25.24% con respecto a la PPRM2, en cuanto a la turbiedad, se respetan los LMP establecidos por la normatividad mexicana en agua potable. Finalmente, la temperatura reportada incrementa en un grado del influente al efluente de la primera planta y decrece en un grado de la entrada a la salida en la segunda planta.

En lo que respecta al Carbón Orgánico Total (COT) y Oxígeno disuelto, como parámetros químicos no se muestra ninguna alteración significativa de la entrada a la salida de las PP. Finalmente se aborda el *E. coli* donde solo se reportan 26 UFC/100mL en el influente de la PPRM1 y en el resto de los puntos muestreados no se mostró presencia de estos.

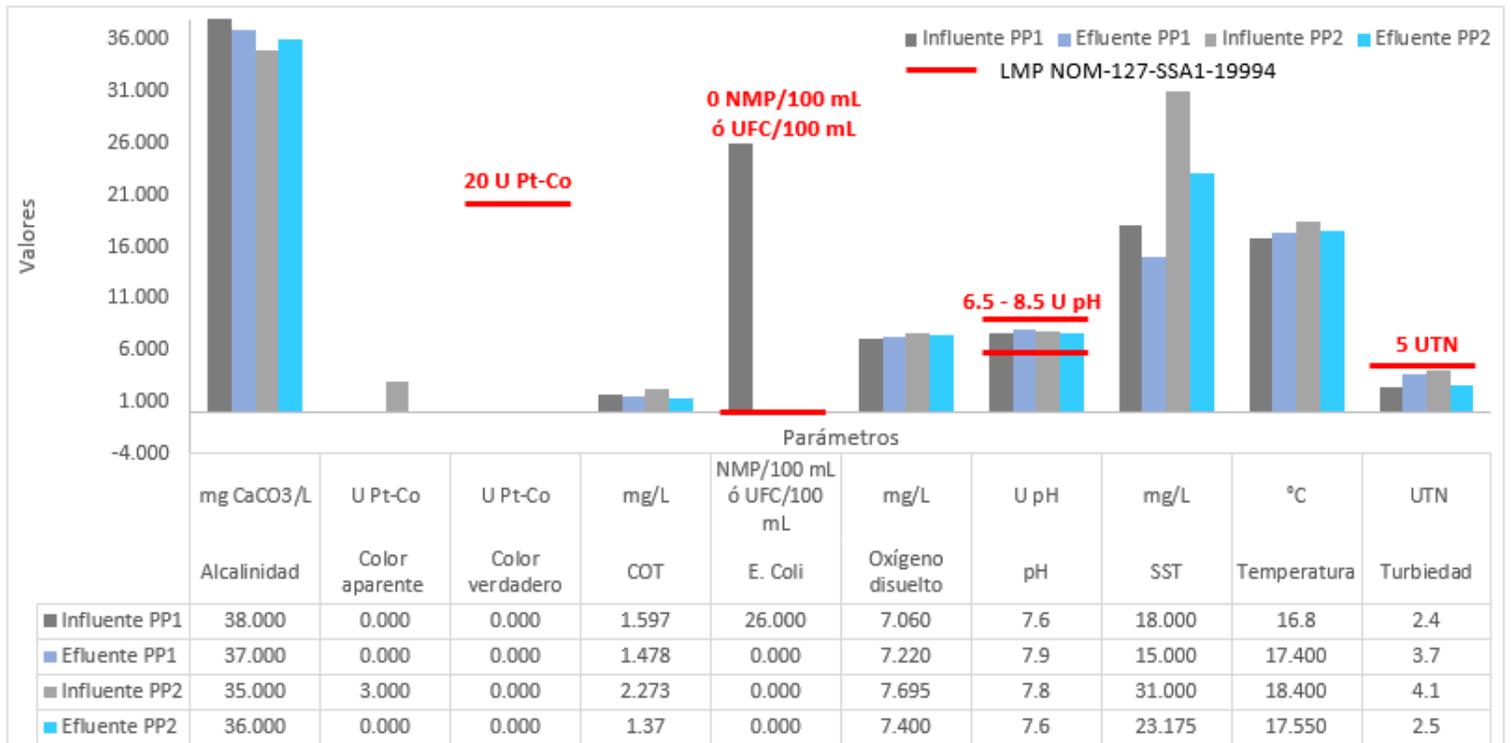


Figura 4. 2. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM1 y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 38 unidades

Para este caso es evidente la disminución de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) desde el primer punto de muestreo, el influente de la PPRM1 al último punto de muestreo PPRM2, por otra parte, los valores de conductividad permaneces constantes en la PPRM1 y un aumento del 17.8% en la PPRM2 de influente al efluente de esta. En lo que respecta a los Coliformes Totales, la calidad de entrada en ambas PP es similar y a la salida se muestra ausencia de estos organismos.

or último, se tiene el parámetro ORP, en el que no se muestra un valor similar en los influentes de estas PP a pesar de tener concentración similar de Coliformes Totales, pero si se obtienen valores de medición similares a la salida de las PP, donde se tiene ausencia de los organismos patógenos.

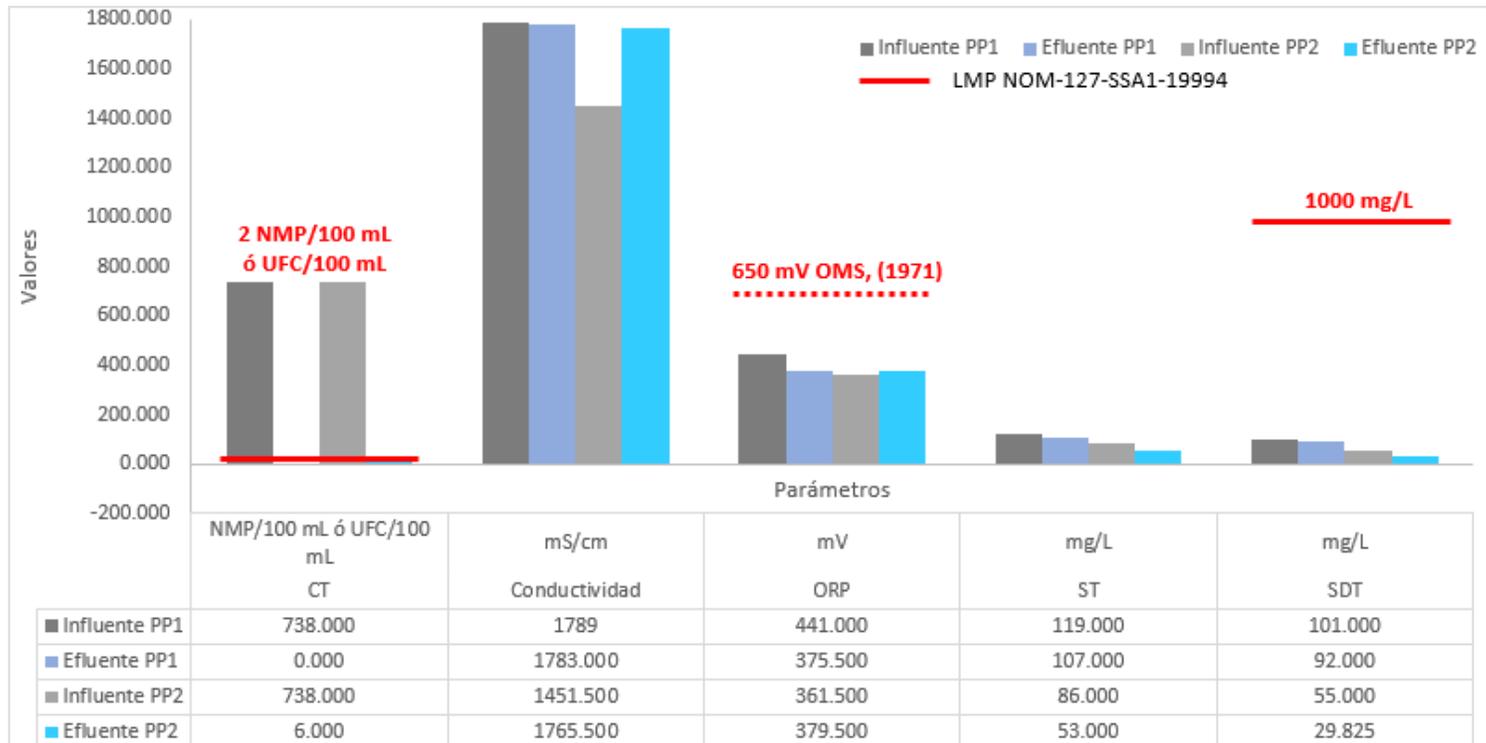


Figura 4. 3. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM 1y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 1783 unidades

Finalmente, se muestra el manganeso (Mn) como un indicador de la materia inorgánica presente, al igual que el hierro (Fe), cuyos valores de Mn se mantienen constantes en todos los puntos muestreados y de igual forma ocurre con tres compuestos de trihalometanos (bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo), con respecto a la medición de nitratos, se observa un aumento en la concentración del efluente de la PPRM2 del 90.5%, sin embargo, este porcentaje no rebasa los establecimientos normativos, lo que no representa un problema en la calidad del agua. Finalmente, el cloroformo si presenta un aumento en la concentración en ambos efluentes de las PP, pero no se muestra ninguna afecta en los establecimientos de la EPA, que fija la cantidad permitida de cloroformo de 1 mg/L.

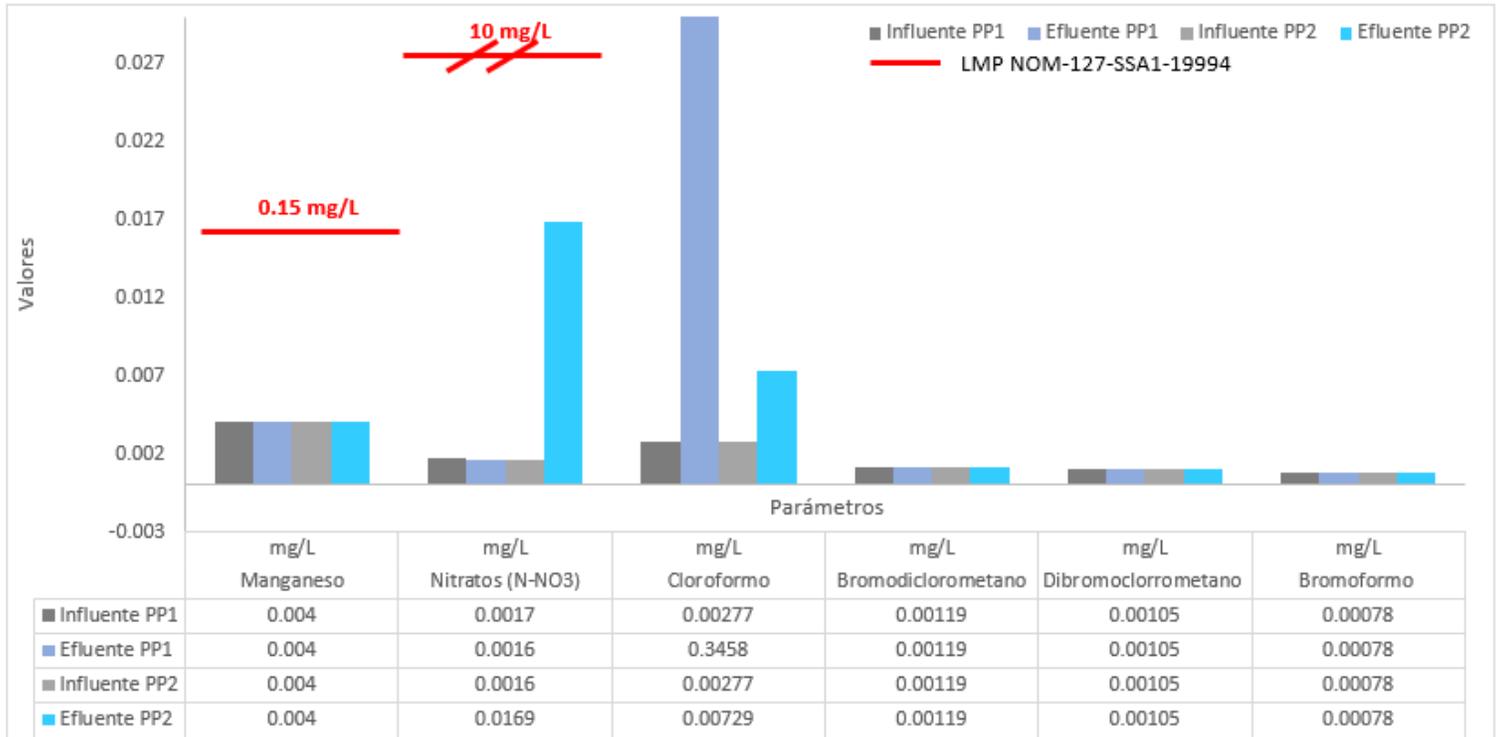


Figura 4. 4. Calidad de agua fisicoquímica en influentes y efluentes de las PPRM 1 y 2 en parámetros cuyos valores ascienden a 0.35 unidades

4.1.2 Muestreo en las operaciones y procesos unitarios de la Planta Potabilizadora Río Magdalena 1

La caracterización fisicoquímica de la PPRM1 también involucró a los procesos y operaciones unitarias de interés en una búsqueda por conocer la calidad del agua antes y después de la desinfección, en todo momento se realizó la comparación con la NOM-127-SSA1-1994 para agua potable. Dentro del primer grupo de parámetros, Figura 4.5, llama la atención los valores obtenidos para la turbiedad, los cuales, en cada punto muestreado, se rebasan los LMP, ni siquiera el valor más bajo se ajusta a la normatividad establecida, como se conoce, la turbiedad aparte de ser un factor estético, es un indicador de la presencia de materia orgánica y organismos presentes en el agua (Fonseca González, et al., 2014), lo que sugiere la probabilidad de no ser apta para consumo humano, incluso se refleja en su apariencia, dichos valores van de 5.12 ± 0.84 a 7.76 ± 0.73 UNT.

Con relación a la absorbancia, sus valores se ven disminuidos conforme el avance de los POU, donde su medición promedio es de 0.039 ± 0.005 cm^{-1} en el efluente representando una remoción del 13.33%. Así mismo, se

tuvieron datos del color aparente, donde su máximo se encuentra en el Influyente Tanque Floculadores con un valor de 10.67 U Pt-Co, pero para el cuidado de la calidad, se toma como referencia el color verdadero, cuyos valores se han reportado como 0 ± 0.0 U Pt-Co y es un buen indicador de la calidad real presente. Finalmente, se observa la temperatura, en la que se busca establecer las condiciones de trabajo experimental y servirá para simular las reacciones que ocurren en el río Magdalena, bajo estos criterios, los valores de temperatura a lo largo del tren de potabilización van de 11.6 ± 2.82 a 18.2 ± 3.23 °C.

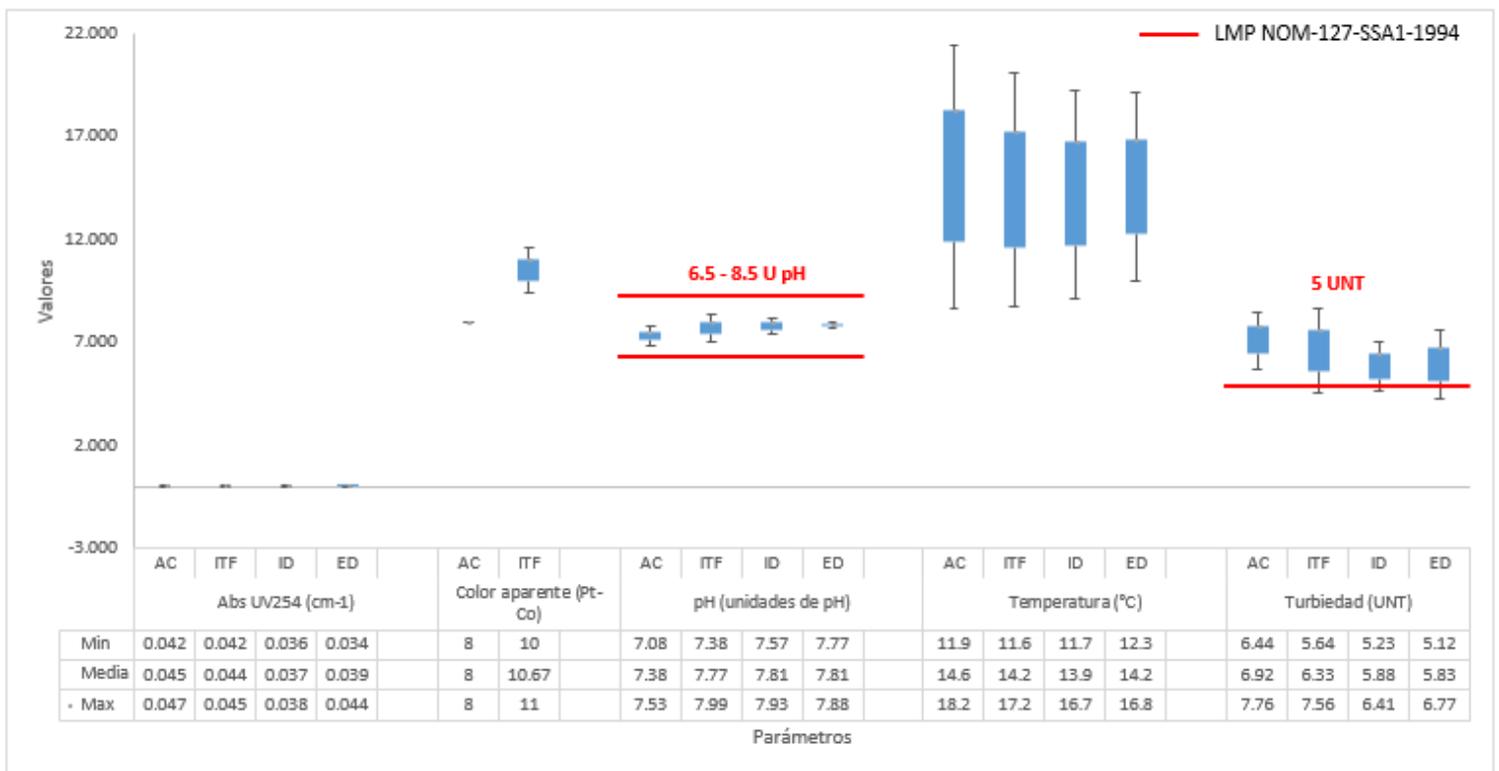


Figura 4. 5. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM en parámetros cuyos valores ascienden a 18.2 unidades

En el siguiente grupo de parámetros, Figura 4.6, se encuentran la Conductividad eléctrica, el ORP y el grupo de sólidos, de estos últimos, los Sólidos Disueltos Totales son los únicos que están normados en agua potable y en ninguna unidad rebasan los LMP, el valor máximo encontrado es en el 126 ± 9.45 mg/L en el punto Efluente Desinfección (ED). Con respecto a los parámetros electrométricos se observa una elevación de valores al entrar al tren de potabilización, mientras que en el influente (Antes Captación, AC) los valores promedio presentes son 817.2 ± 16.66 mS,

para conductividad eléctrica y 292 ± 45.32 mV para ORP, se destaca de este último parámetro que su valor medido después de la oxidación con cloro en la PPRM1, hasta llegar al Efluente Desinfección no presenta una variación amplia, va de 637 ± 19.07 mV a 666 ± 7.81 mV, lo que equivale a un incremento del 4.35%.

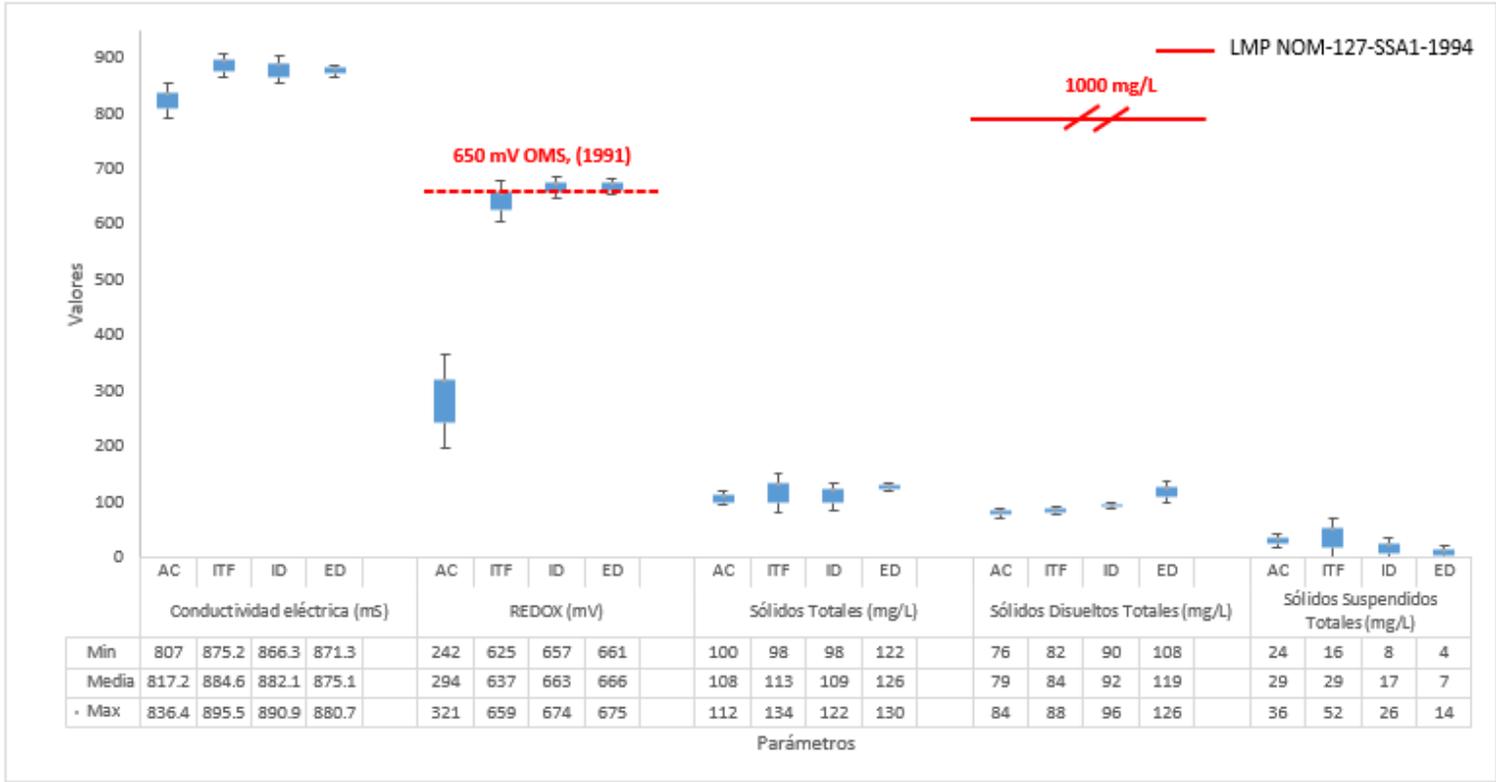


Figura 4. 6. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM1 en parámetros cuyos valores ascienden a 895.5 unidades

En la Figura 4.7 se abarcan los parámetros químicos medidos en los POU, en primer instancia se cuidan los LMP para el uso y consumo del agua potabilizada, sin embargo, en CRL y en Nitratos, se muestra una violación a la normatividad mexicana, en ambos parámetros en el punto Efluente Desinfección, como se ha mencionado anteriormente, rebasar las concentraciones sugeridas en CRL promueve la formación de trihalometanos que sugieren daños a la salud como efectos cancerígenos, por otro lado, concentraciones altas de nitratos pueden causar metahemoglobinemia que podría llegar a causar la muerte por asfixia, principalmente en infantes. Por otra parte, los parámetros Hierro y Manganeso permanecen prácticamente constantes a lo largo del tren de potabilización y sin rebasar los LMP.

la turbiedad muestran LMP, los cuales no representan un riesgo a la salud humana ya que en el punto de muestreo Efluente Cárcamo Desinfección todos los datos obtenidos se encuentran por debajo de los establecimientos normativos.

Por otra parte, la absorbancia UV_{254nm} como indicador de la materia orgánica, presenta una disminución promedio del 33.9%, por su parte, la temperatura oscila de los 14.33 ± 0.97 a los 16.25 ± 0.21 °C a lo largo del tren de potabilización.

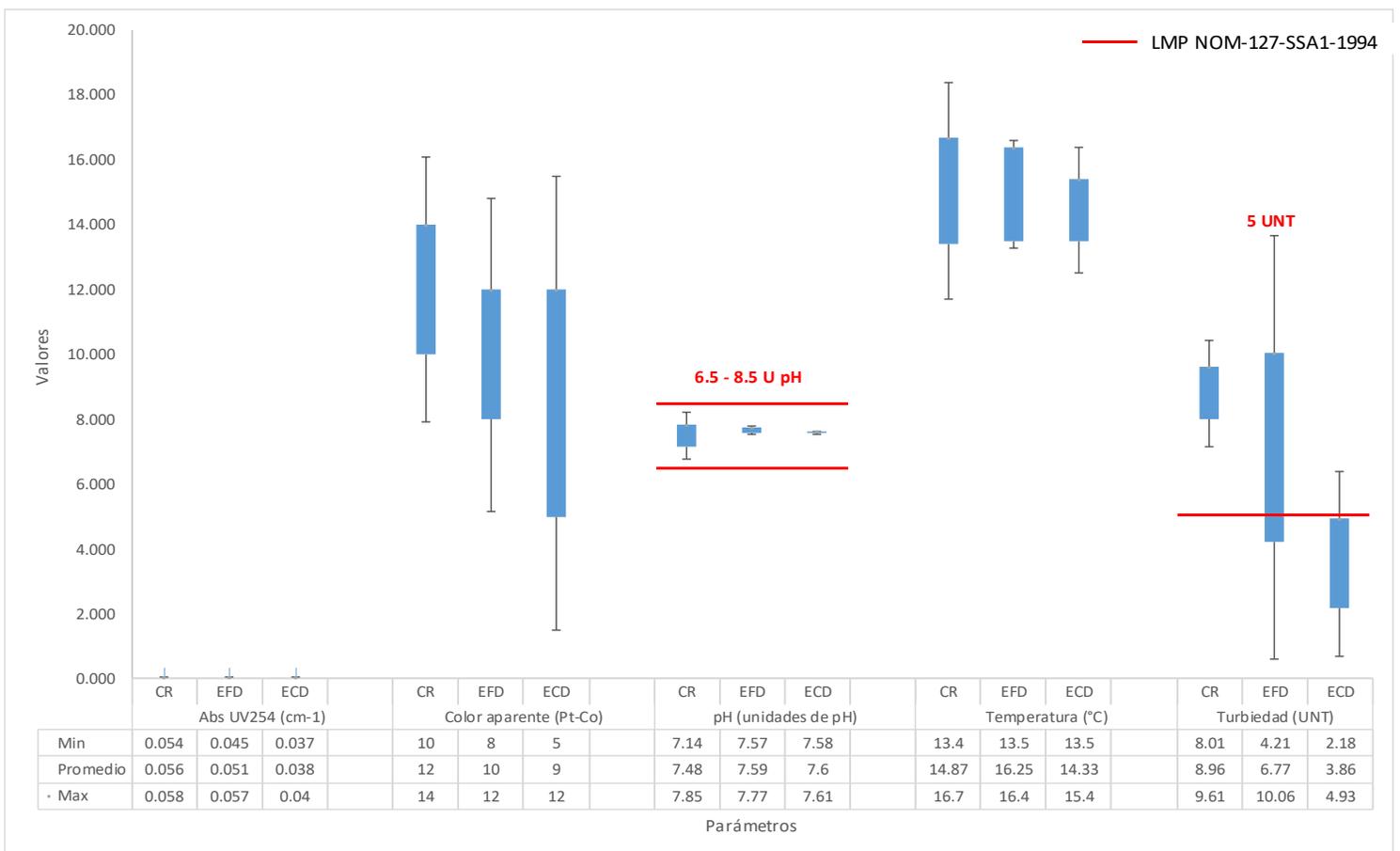


Figura 4. 8. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM2 en parámetros cuyos valores ascienden a 16.7 unidades

En la sección siguiente donde se abarcan los parámetros potenciométricos y la gama de sólidos, Figura 4.9, se destaca que en el ORP no se alcanza el valor establecido por la OMS, (1971) de 650 mV para asegurar la inactivación de patógenos, lo que resalta de este caso, es que a pesar que la adición de cloro se lleva a cabo hasta el punto de Efluentes

Filtros Duales, en el punto Captación Río se comienza con un valor alto de ORP de 423 ± 42.57 mV, en comparación con la PPRM1, sin embargo, la Conductividad eléctrica si presenta esta ascendencia en sus valores al paso del tren de potabilización.

Por su parte, los Sólidos Disueltos Totales se encuentran debajo de los establecimientos normativos y su fracción total, presenta una disminución del 3.9%.

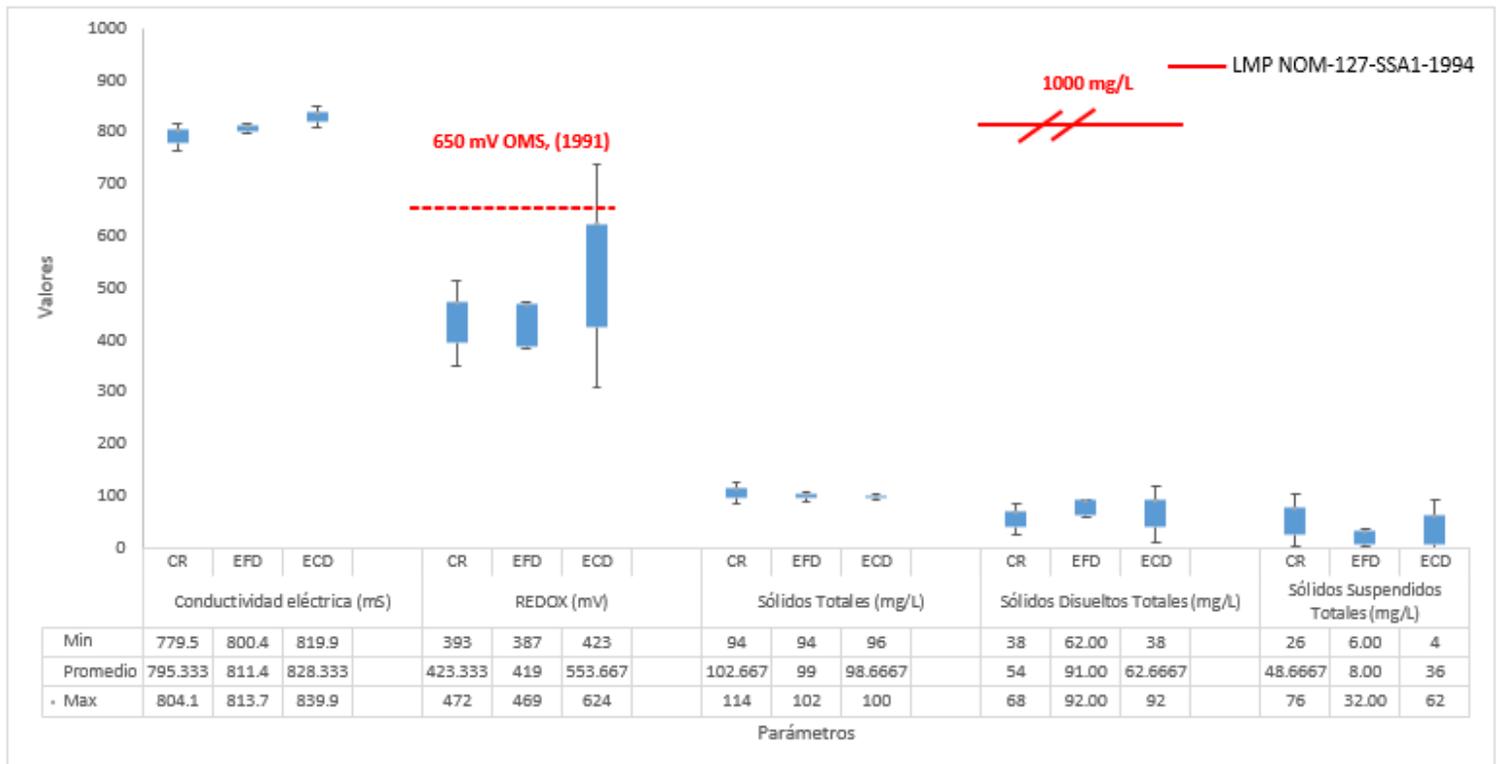


Figura 4. 9. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM2 en parámetros cuyos valores ascienden a 840 unidades

Finalmente, en el abordaje de los parámetros químicos, Figura 4.10, la alcalinidad permanece prácticamente constante de forma similar al pH a lo largo de la potabilización, sirviendo como amortiguamiento en la formación de especies ácidas o básicas. Por su parte, los CRL, Hierro y Nitratos se adaptan a los LMP dictados por la normatividad mexicana en agua potable, de tal forma que se presume la aceptabilidad en la calidad de agua para consumo humano en estos parámetros. Sin embargo, en lo que respecta al Manganeso, se obtuvo un incremento del 23.25% en el Efluente Cárcamo Desinfección con respecto a la Captación Río, y este

aumento provoca la violación de los LMP 2.86 veces, esto es importante porque se sugiere que la ingesta de niveles altos de Mn en agua, afecta el desarrollo del cerebro de los niños, limitando la memoria, atención e incluso problemas motores.

Finalmente, en los parámetros COT y OD se muestra el incremento de valores en el punto Efluente Filtros Duales, con respecto la Captación Río y al Efluente Cárcamo Desinfección, la razón de ello podría referirse a que estos valores corresponden a la última toma de muestra al final del día.

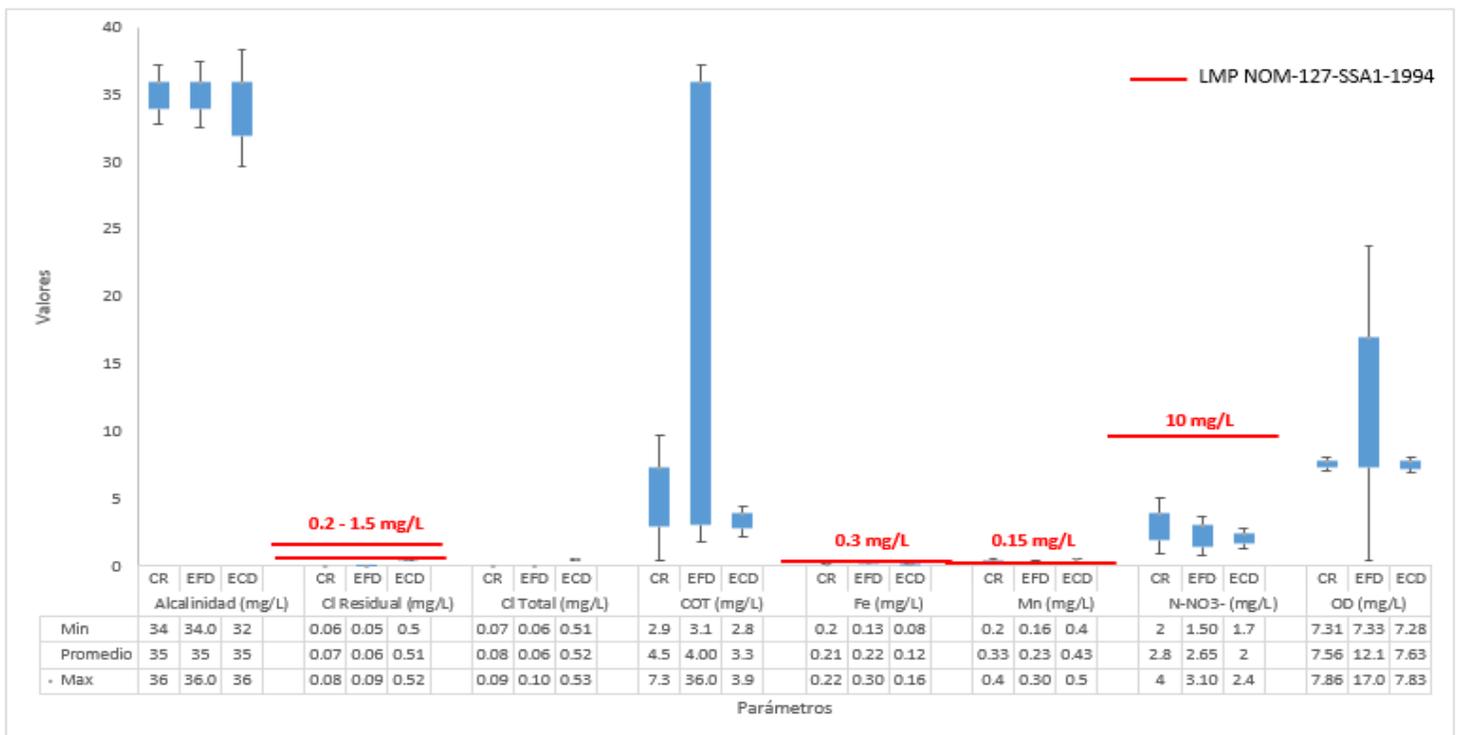


Figura 4. 10. Calidad de agua fisicoquímica en procesos y operaciones unitarias de la PPRM2 en parámetros cuyos valores ascienden a 36 unidades

4.1.4 Muestreo para análisis microbiológicos en las operaciones y procesos unitarios de la Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2

La determinación microbiológica realizada en cada proceso y operación unitaria de las PP, mostrada en la Figura 4.11, de forma general muestra ausencia en los efluentes de los trenes de potabilización, de organismos patógenos Coliformes Totales y *E.coli* como indicadores, lo que asegura

una calidad aceptable para consumo humano y sin riesgo de tener alguna complicación como cuadro intestinal.

La población de Coliformes Totales en ambas plantas es muy similar en su entrada, sin embargo, en *E.coli* la diferencia es del 97.6% mayor en la PPRM1 que en la PPRM2, dicho porcentaje no debe representar algún riesgo en la salud humana ya que se muestra la ausencia de este parámetro en ambos efluentes de las PP. Para el resto de las etapas de potabilización, no existe un valor significativo que ponga en duda la aceptabilidad de la calidad del agua potable.

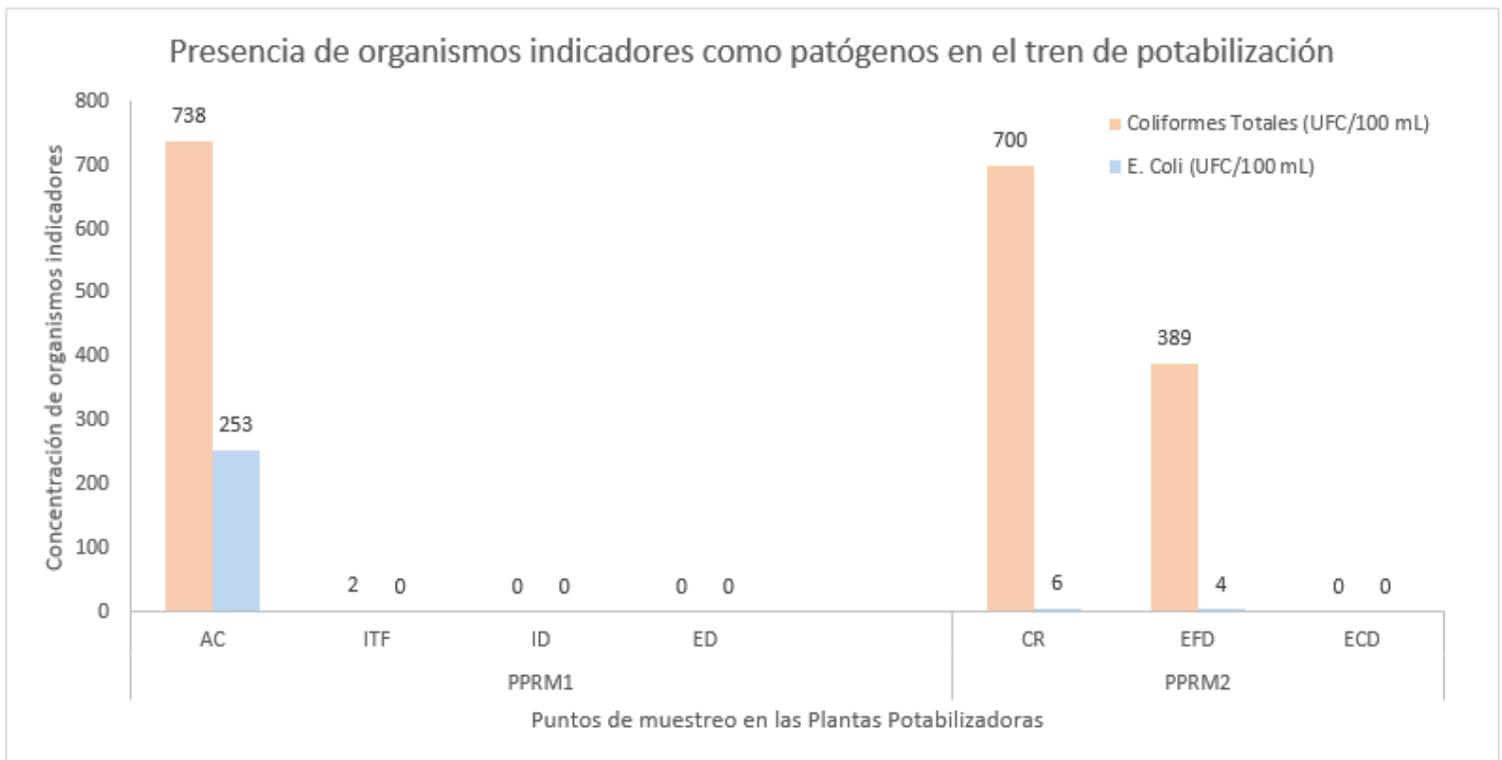


Figura 4. 11. Calidad de agua microbiológica en procesos y operaciones unitarias de las PPRM1 y 2

4.3 Cloración al Punto de Quiebre

En este análisis se muestra la influencia de la adición de cloro a las muestras de agua, se aborda principalmente la actividad de CRL con respecto a algunos indicadores involucrados en este proceso, como lo son la acidez y basicidad para la presencia de las especies desinfectantes, la oxidación de la materia inorgánica, así como orgánica. En primera

instancia se muestra de forma general las curvas obtenidas al punto de quiebre.

Los puntos de quiebre obtenidos mediante la cloración de muestras se muestran en la Figura 4.12, cuya finalidad fue encontrar los valores mínimos de concentración de cloro a través de la cual se da paso a la desinfección. En ninguno de los casos mostrados, se alcanzaron los LMP dictados por la normatividad mexicana en el caso del Cloro Residual Libre, sin embargo, para el Exploratorio y la PPRM1, el valor de CRL se indicó en 0.03 mg/L, para el caso de la PPRM2, el valor fue de 0.08 mg/L. Dichos valores indican que, a partir de este punto, se está llevando a cabo la ausencia de organismos Coliformes Totales y *E. coli*. En estos puntos, se conoce que la dosificación fue de 0.175mg/L para el primer caso y de 0.225 a 0.275 mg/L para el segundo caso.

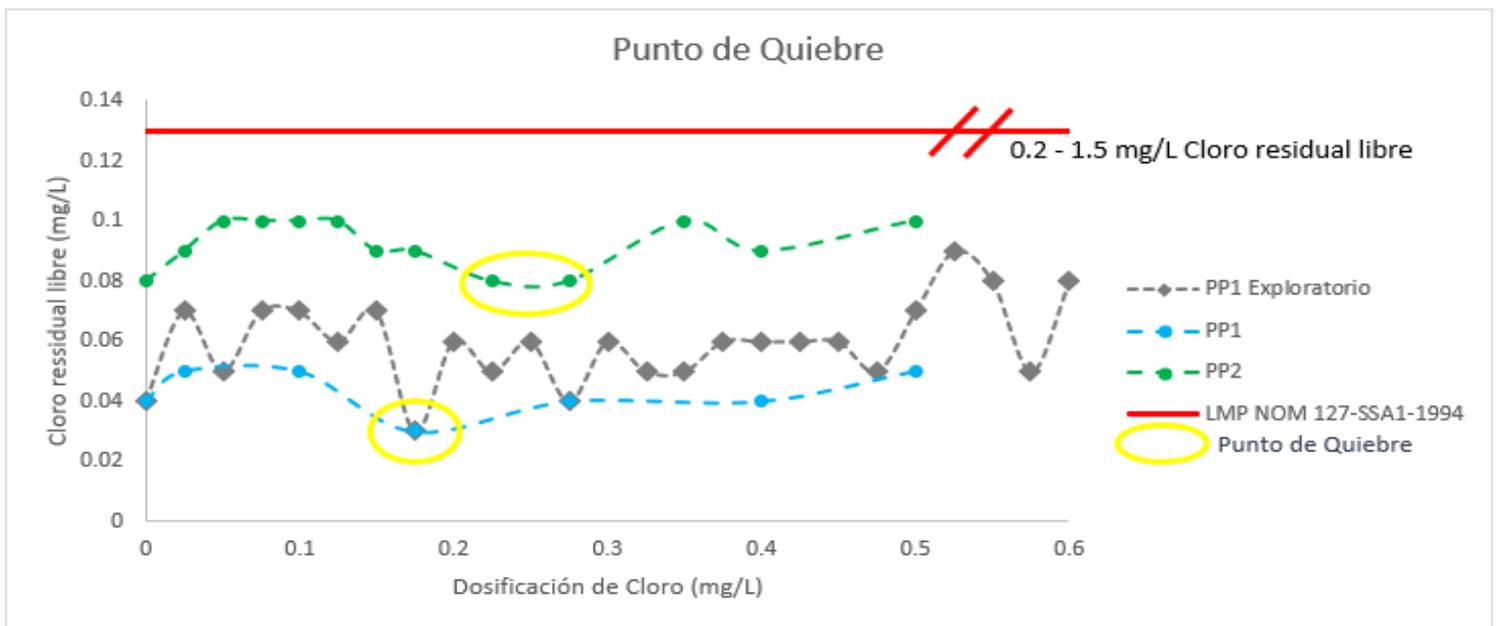


Figura 4. 12. Curva resultante de la cloración mediante el punto de quiebre, PPRM 1 y 2

Ya se mostró que la actividad del CRL arrojó el valor mínimo de 0.003 mg/L, pero aquí se destaca el seguimiento que tiene el Cloro Total (CIT), cuyo valor mínimo coincidió con el del CRL y fue de 0.05 a la misma concentración dosificada de 0.175 mg/L. Con respecto al pH prácticamente permanece constante donde los valores van de 7.43 a 8.13 unidades de pH, y cuya especie predominante es ion hipoclorito (OCl^-) Tchobanoglous, (2012), lo que sugiere una mayor concentración de cloro para compensar

la menor capacidad desinfectante del ion, en comparación con el ácido hipocloroso (Macizo, 2007), por su parte, la alcalinidad presentó valores que van de 30 a 36 mg CaCO₃/L, Figura 4.13.

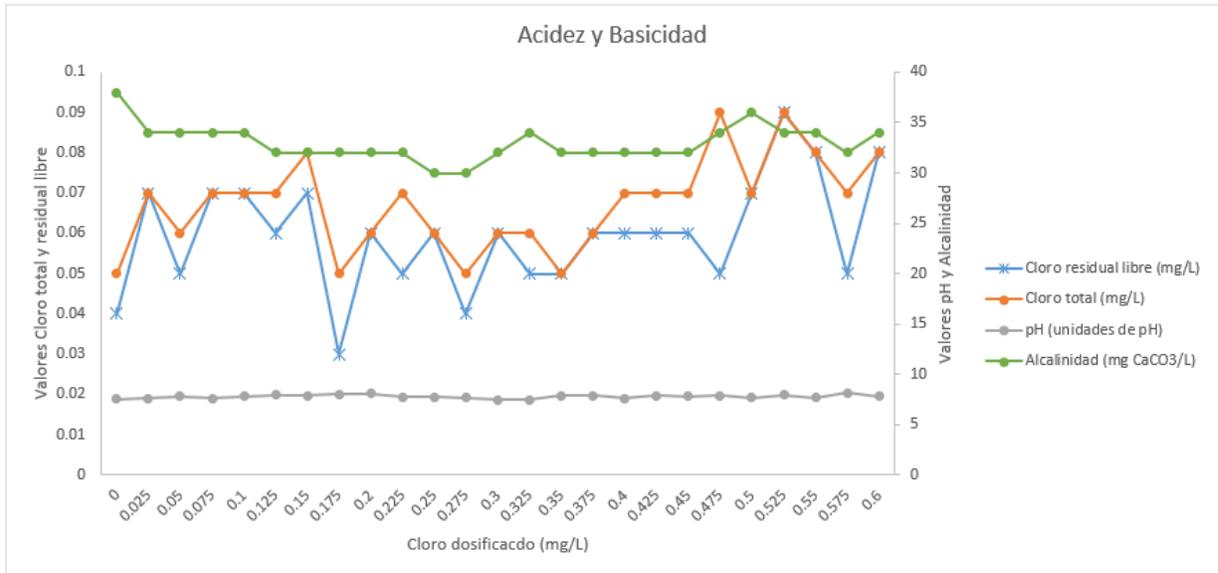


Figura 4. 13. Valoración de la acidez y basicidad durante la cloración al punto de quiebre

El cloro que se agrega al agua, reacciona rápidamente con las sustancias inorgánicas reducidas, fundamentalmente con los compuestos reducidos de hierro y manganeso, perdiendo su capacidad germinicida (Luque Torrez, 2018), de allí la importancia en el monitoreo de estos parámetros, mostrados en la Figura 4.41, donde la oxidación de dichos componentes, muestra una remoción del 27.8% del Fe inicial con respecto al final de la desinfección y cuyos valores reportados va de 0.1 a 0.6 mg/L. Por su parte el Mn cuyos valores están entre 0.13 a 0.23 mg/L muestra saltos entre máximos y mínimos conforme el cloro residual libre se hace presente a lo largo de la desinfección.

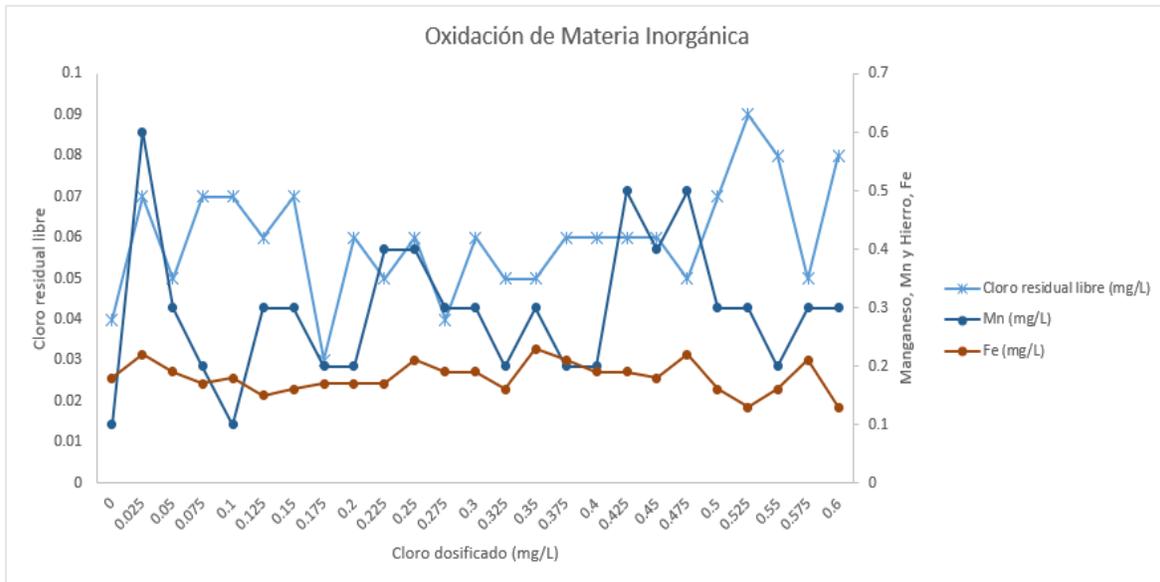


Figura 4. 14. Valoración de la oxidación de la materia inorgánica durante la cloración al punto de quiebre

Se abordó el comportamiento de la materia orgánica usando como indicadores la absorbancia Uv_{254nm} , cuyos valores van de 0.093 a 0.229 cm^{-1} a lo largo del CRL obtenido, Figura 4.15, entre las principales funciones de la materia orgánica, se encuentran la formación de subproductos como los trihalometanos (THM) potencialmente carcinógenas, como la suma de cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo (Ramírez Quirós, 2010).

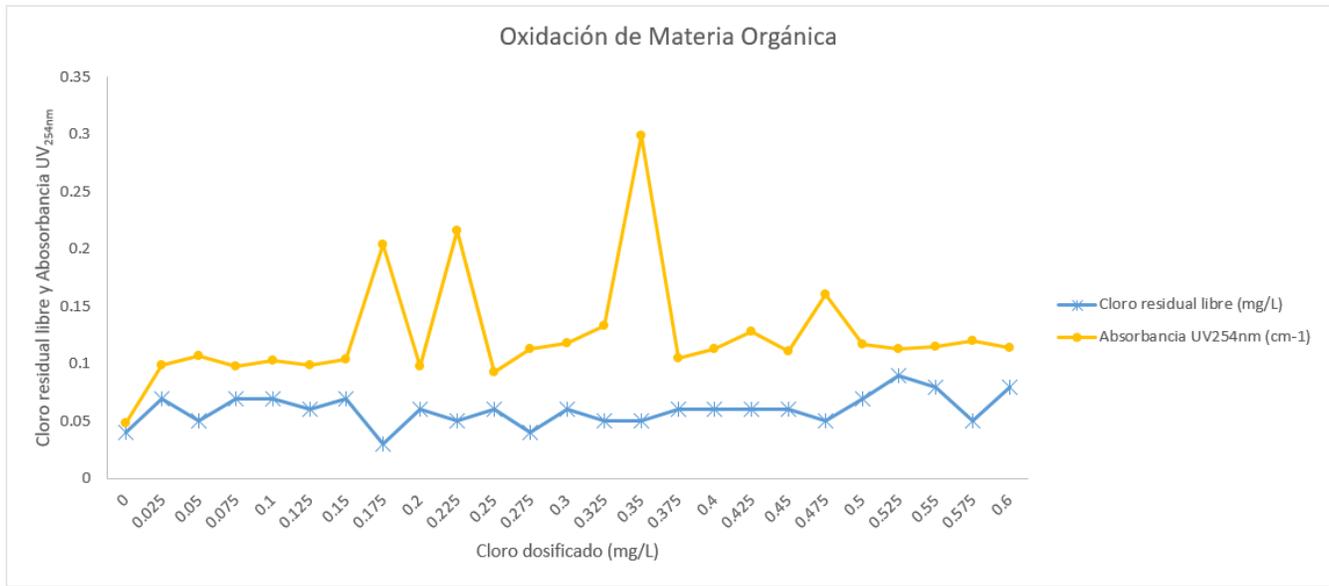


Figura 4. 15. Valoración de la oxidación de la materia orgánica durante la cloración al punto de quiebre

4.4 Desinfección

El primer caso de estudio y análisis correspondió al Exploratorio, en el que se abarcaron dosificaciones suficientes para mostrar la actividad patógena en la adición creciente de cloro y con el tiempo de contacto fijo en cinco minutos. La prueba de desinfección comenzó con un ORP de 242 mV, 738 UFC/100 mL de Coliformes Totales, 86 UFC/100 mL de *E. coli* y 0.04 mg/L de CRL, Figura 4.16.

Se involucraron las variables de interés en la desinfección, en primera instancia se muestra el valor mínimo presente como cloro residual, el cual indica la concentración mínima de cloro que debe estar presente en esta muestra para comenzar la inactivación o destrucción de los organismos indicadores, tanto Coliformes Totales (CT) como *E. coli*, en este punto se cuenta con un ORP de 385 mV, valor que no es suficiente para asegurar la calidad microbiológica en agua potable, dado que se cuenta con una concentración de 4 UFC/100 mL en cuanto a CT y 0 UFC/100 mL en *E.coli*.

Sin embargo, a un ORP de 600 mV se muestra la ausencia total de estos organismos, a este valor se obtuvo 0.07 mg/L de CRL y la dosificación correspondiente fue de 0.5 mg/L, se está hablando de concentraciones muy bajas en comparación con los LMP de la NOM-127-SSA1-1994 que van

de 0.2 – 1.5 mg/L, y aunque no se alcanza el mínimo recomendado, se presume que con dosificaciones muy bajas de cloro es posible inactivar o destruir los organismos patógenos como CT y *E. coli*.

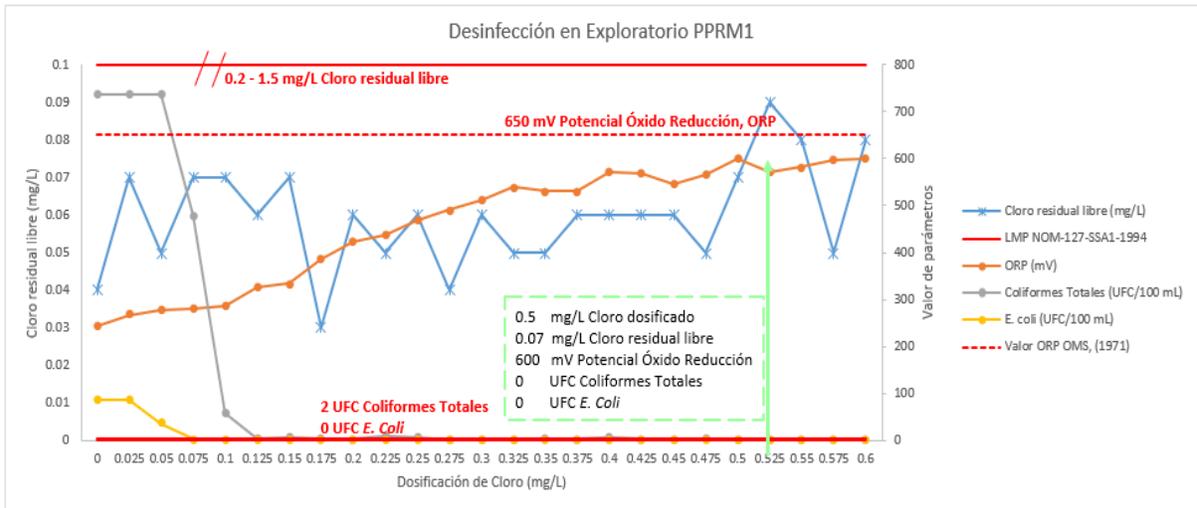


Figura 4. 16. Desinfección en Exploratorio PPRM1

Del exploratorio, se obtuvieron las dosificaciones exactas en las que el punto de quiebre se hizo presente, la prueba comenzó con ORP de 244 mV, 738 UFC/100 mL de Coliformes Totales, 30 UFC/100 mL de *E. coli* y 0.04 mg/L de CRL, Figura 4.17.

De estas dosificaciones, el CRL mínimo nuevamente presentó un valor de 0.03 mg/L con una concentración dosificada de cloro de 0.175 mg/L, en este punto se obtuvo un ORP de 292 mV con una concentración de 8 UFC/100 mL y 0 UFC/100 mL para Coliformes Totales y *E. coli*, respectivamente. Por otra parte, al igual que en el caso anterior, se mostró ausencia de estos organismos a un valor de 509 mV, con una concentración de Cl RL de 0.05 mg/L y 0.5 mg/L de cloro dosificado.

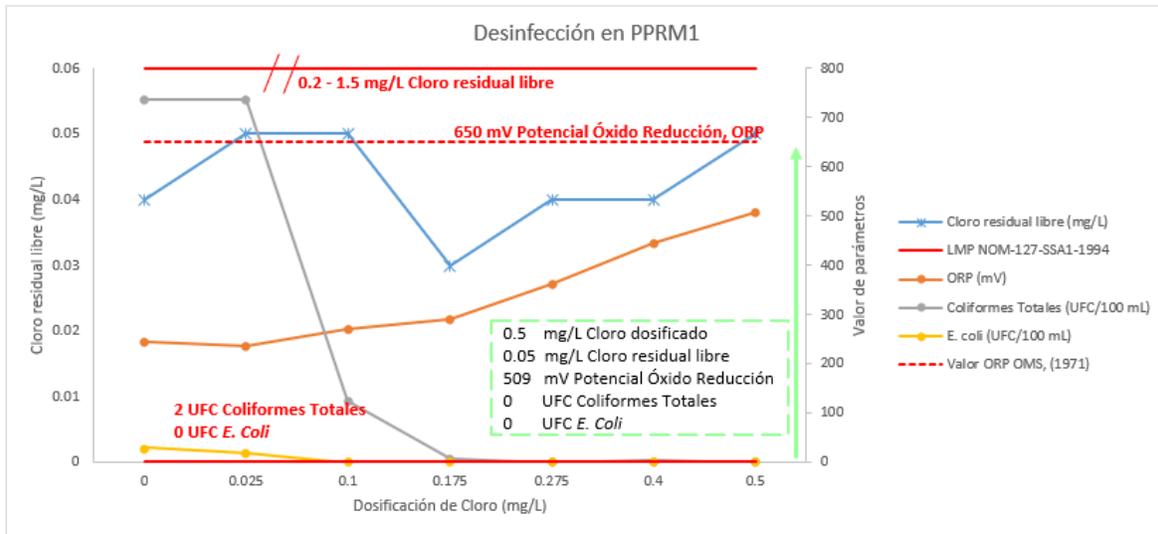


Figura 4. 17. Desinfección en PPRM1

En cuanto a la PPRM2, siguiendo el mismo análisis, se comenzó la prueba con ORP de 225 mV, 738 UFC/100 mL de Coliformes Totales, 8 UFC/100 mL de *E. coli* y 0.08 mg/L de CRL, Figura 4.18.

El punto de quiebre se da en 0.08 mg/L como CRL, cuyas dosificaciones fueron de 0.225 y 0.275 mg/L, y para este último valor, se muestra una concentración de 8 UFC/100 mL para Coliformes Totales y 0 UFC para *E. coli*, con un valor de ORP de 388 mV. La desinfección completa se obtuvo al llegar a un ORP de 457 mV, con 0.4 mg/L de cloro dosificado, arrojando 0.09 mg/L de CRL y ausencia de estos patógenos.

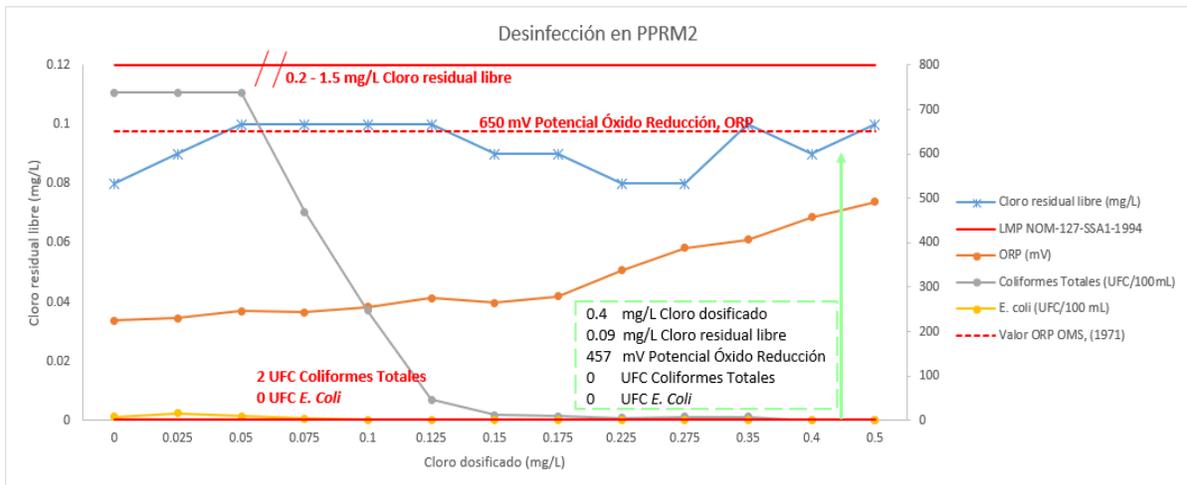


Figura 4. 18. Desinfección en PPRM2

De forma general, se muestra un aumento en los valores de ORP, mientras existe un decaimiento en los organismos indicadores de patógenos.

4.5 Interacción del ORP con algunos parámetros de interés

Se estudió la interacción del Potencial Óxido Reducción (ORP) con respecto a las concentraciones crecientes de cloro dosificadas bajo un tiempo de contacto constante, el cual fue de 5 minutos, como se estableció en la metodología. Se obtuvieron correlaciones con $r^2 > 0.9$ en los tres casos, el exploratorio, PP1 y PP2, Figura 4.19, lo que indica que una vez establecido el valor de ORP que muestre la ausencia de organismos patógenos, se podría obtener una aproximación de la concentración dosificada de cloro, y en consecuencia un aproximado de la concentración de cloro residual libre presente.

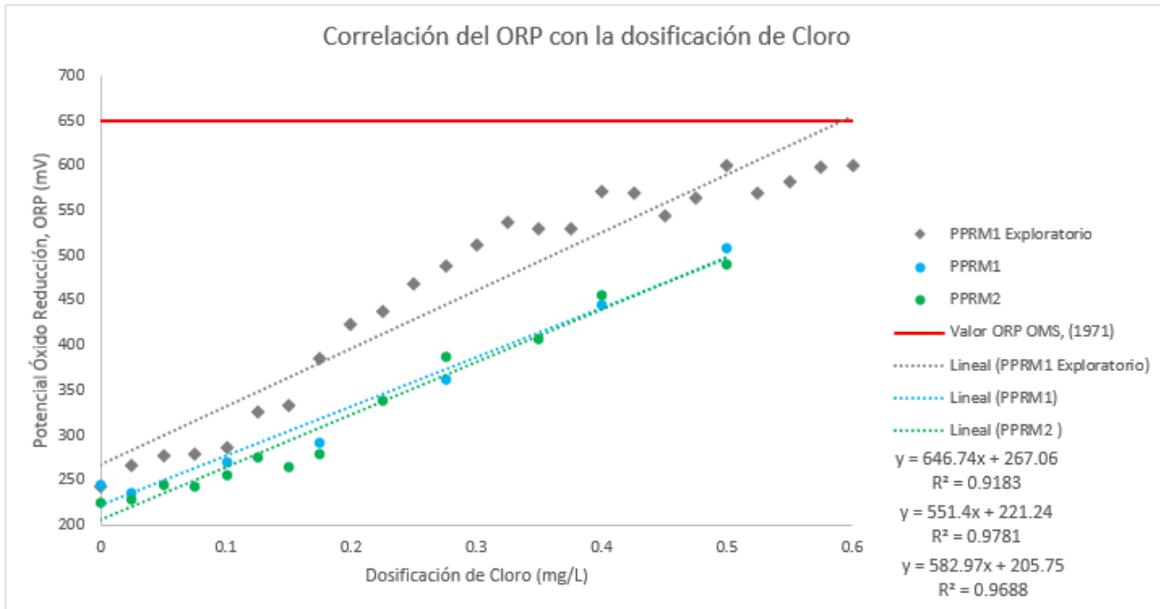


Figura 4. 19. Correlación del ORP con respecto a la concentración de Cloro

Se estableció como variable de respuesta la desinfección mediante la cloración al punto de quiebre, de tal forma que su interacción con el ORP mostró correlaciones polinómicas de tercer grado en los tres casos estudiados con un $r^2 > 0.8$, Figura 4.20, en los que se muestra el decaimiento de los organismos Coliformes Totales, obedeciendo a un valor de 600 mV en todos los estudios, dicho valor es menor al establecido por la OMS, (1971) que fue de 650 mV, y lo cual evidencia que estas baterías presentan una menor resistencia de inactivación con respecto a los virus.

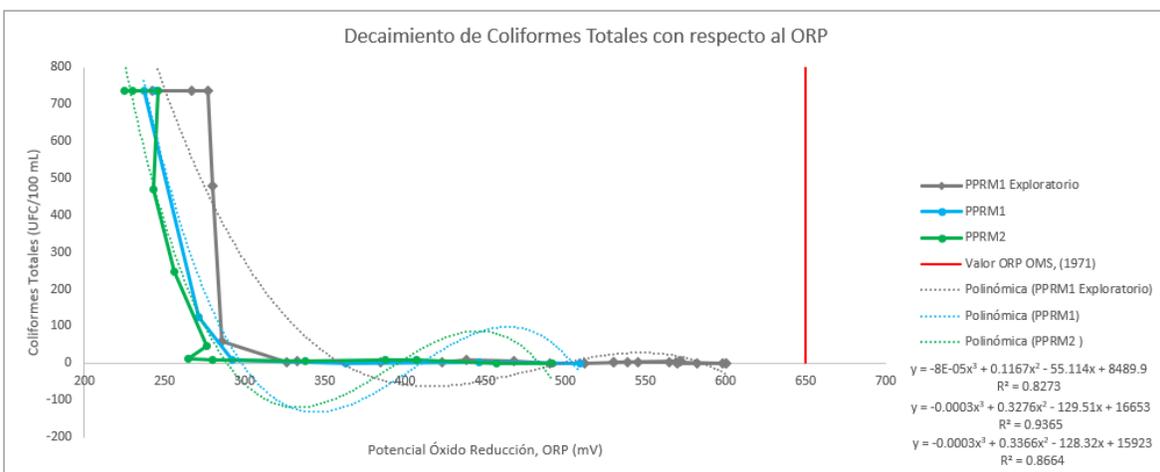


Figura 4. 20. Correlación del ORP con respecto a Coliformes Totales

De igual forma, de la interacción de *E. coli* con respecto al ORP, se obtuvieron correlaciones del tipo polinómico de tercer grado donde $r^2 > 0.6$, Figura 4.21, y donde la inactivación para estos organismos también obedece a los 600 mV, valor que se encuentra por debajo del ORP que sugiere mostrar ausencia de virus, de acuerdo con la OMS, (1971), para todos estos casos de estudio.

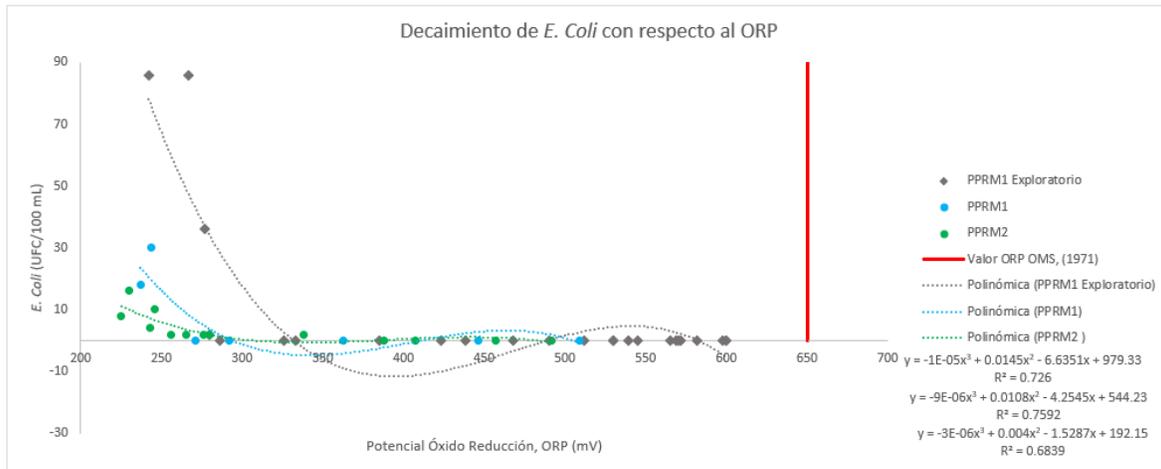


Figura 4. 21. Correlación del ORP con respecto a Coliformes fecales

Finalmente, se estudió la posibilidad de la existencia de correlaciones entre los parámetros partícipes y el Potencial de Óxido Reducción, la conclusión con respecto a este análisis es que, para todos los casos se presentan ecuaciones de tipo polinomial grado tres y cuyo factor de correlación (R^2), no rebasa las 0.7 unidades. Estos casos de estudio no son presentados en este apartado, pero se pueden consultar en el anexo A1.

(CONAGUA, 2019)

4.6 Cinéticas de Desinfección y Pruebas de Recrecimiento

Se abordan los resultados obtenidos en los modelos de desinfección propuestos, en los que se evaluaron las PP Río Magdalena 1 y 2. Estos se distribuyen en función de la evolución matemática de cada modelo.

Por otra parte, en esta sección también se muestran aquellos datos obtenidos durante algunos estudios de recrecimiento realizados, considerando las condiciones de desinfección obtenidas de forma experimental de cada PP.

4.6.1 Modelo de Chick

Chick, (1908) ofrece un modelo sencillo que evalúa la persistencia de los organismos ($\ln N_t/N_0$) a lo largo del tiempo (t), tras entrar en contacto con un medio desinfectante (C de Cl_2), (Chick, 1908). Esta persistencia es evaluada mediante la velocidad de reacción resultante en el proceso de desinfección con variación de dosificaciones de cloro y tiempo de contacto. En la Tabla 4.1 se muestran las condiciones de desinfección obtenidas en la PPI donde, se muestra la velocidad de reacción $k = -0.7235$ con un $r^2 = 0.51$ para Coliformes Totales y por otro lado fue de $k = -1.1932$ con un $r^2 = 0.99$, mostrando un mejor ajuste para este modelo, para ambos casos se obtuvo un $n < 1$, lo que implica que el tiempo de contacto cobra relevancia en lugar de la concentración de cloro (Magaña López, 2018).

Tabla 4. 1. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Chick en PPI

Concentración (mg/L)	Coliformes Totales			<i>E. coli</i>		
	k	Ecuación de ajuste	n	k	Ecuación de ajuste	n
0.025	0.1548	$y = -0.7235x - 1.6687$ $r^2 = 0.51$	-19.2528	1.0452	$y = -1.1932x + 0.2124$ $r^2 = 0.99$	-4.8780
0.1	0.7317			0.6453		
0.175	0.7848			2.0369		
0.275	0.6744			0		
0.4	1.102			0		
0.5	0.8935			1.0452		

En la Figura #, se muestran las velocidades de inactivación de patógenos, obtenidas en la PPI, entre todas las dosificaciones presentes, de forma general se muestra que es mayor la inactivación de *E. coli*, comparada con la de Coliformes Totales, para este último aún se muestran curvas de inactivación no bien definidas, por el contrario de *E. coli*.

Adicionalmente, se le da especial mención la concentración de 0.5 mg/L, ya que en esta se encontró una desinfección favorecedora en las condiciones de ORP preestablecidas. Esta muestra una velocidad de inactivación $k = 0.8935$ con una inactivación del 99.72% para Coliformes Totales con un tiempo de contacto de 5 min y k para *E. coli* de 1.0452 con una inactivación del 95.65%, la cual, en comparación con los Coliformes

Totales, fue 1.17 veces más grande usando solo 3 min de tiempo de contacto para ello.

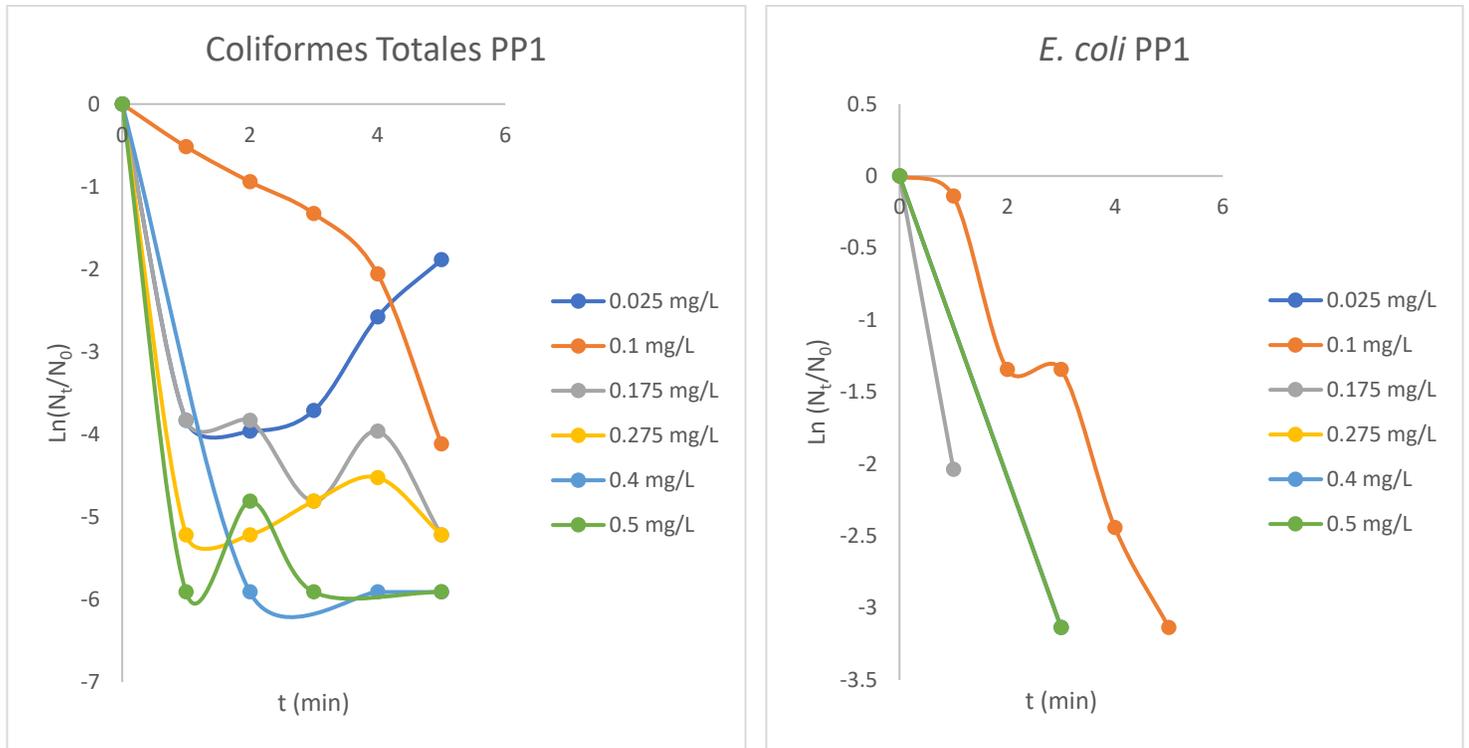


Figura 4. 22. Tasa de supervivencia de organismos control, mediante el modelo de Chick en PP1

Por otro lado, de forma simultánea, se obtuvo la cinética de desinfección para la PP2, Tabla 4.2, que muestra la velocidad de reacción tanto para Coliformes Totales como para *E. coli*, donde el valor que toma k fue de -0.9037 y -0.5731 , respectivamente. Para este caso, se muestra un mejor ajuste para la supervivencia de coliformes totales, con respecto a *E. coli*, para ambos casos $n < 1$ enfatiza la importancia del tiempo de contacto, sobre la concentración establecida.

Tabla 4. 2. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Chick en PP2

Concentración (mg/L)	Coliformes Totales			<i>E. coli</i>		
	k	Ecuación de ajuste	n	k	Ecuación de ajuste	n
0.025	1.654	$y = -0.9037x - 1.9552$	-14.4332	0.2007	$y = -0.5731x - 0.5140$	-0.0278

0.1	0.7039	r ² = 0.55	0.2435	r ² = 0.55
0.175	0.6076		1.7047	
0.275	0.8138		1.1989	
0.4	0.7192		0.0455	
0.5	0.9236		0.0455	

Con respecto al modelo de Chick aplicado sobre la PP2 se obtuvieron las gráficas siguientes, Figura #, sobre las que se presta atención sobre el comportamiento de la concentración dosificada en 0.4 mg/L, que de acuerdo con los estudios de desinfección, fue la que favoreció la inactivación de los organismos control. En esta concentración de obtuvieron velocidades de reacción k de -0.9037 y -0.5731, respectivamente y cuya inactivación fue del 99.45% y 63.63% para cada caso, estos porcentajes discrepan con los resultados obtenidos durante la desinfección, la razón de ello puede atribuirse a la población de organismos indicadores presentes en la muestra de agua, ya que estos estudios de cinética se realizaron en fechas posteriores a los estudios de desinfección y sus condiciones reportadas al final del estudio, no fueron fijas de una fecha a otra. Esto se puede ver en la Tabla 4.5, que muestra un resumen de las condiciones de calidad, al final de los estudios de cinética.

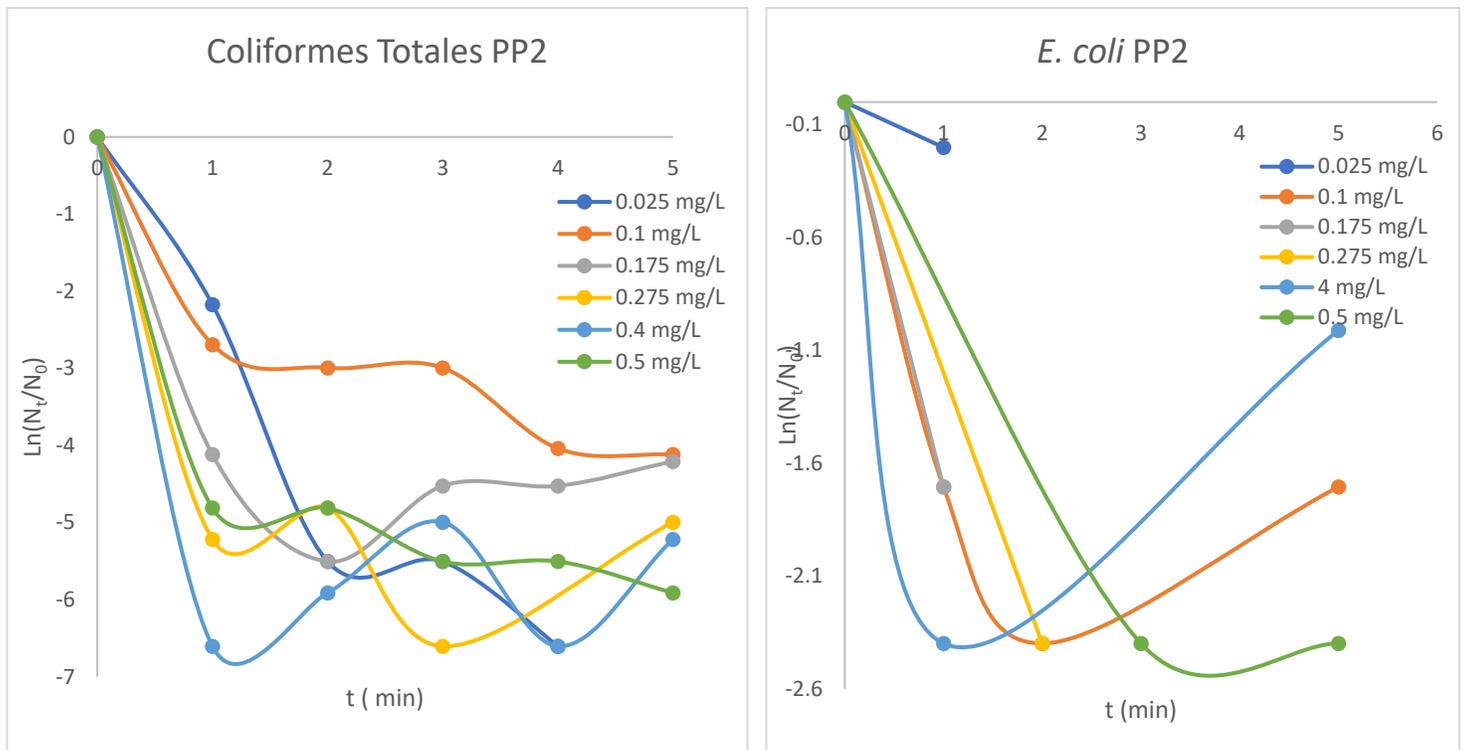


Figura 4. 23. Tasa de supervivencia de organismos control mediante el modelo de Chick, en PP2

4.6.2 Modelo de Watson Chick

De la obra de Chick, Watson, (1908) propuso una función para promover el efecto de diferentes concentraciones del desinfectante, donde se plantea una constante para un microorganismo específico (k), así como un coeficiente que representa el número promedio de moléculas combinadas con el organismo, necesarias para causar la inactivación (n) y un tiempo (t) requerido para alcanzar un nivel dado de inactivación (By Lyndon & Gordon , 1998).

Este modelo, se sugiere, prevé un mejor ajuste de los datos experimentales obtenidos, estos son representados en la Tabla 4.3, en la que se abarcaron los organismos control para la PP1, en donde, se encontró un mejor ajuste de los datos en *E. coli* con un $r^2= 0.9552$ y la velocidad de inactivación $k= -37.1963$, la cual 1.45 veces más grande que la de los coliformes totales donde su k fue de -25.4950 con un ajuste r^2 de 0.53.

Este modelo, muestra que para la inactivación de coliformes totales es más importante considerar el tiempo de contacto que se le dé en la desinfección sobre la concentración del desinfectante, sin embargo, para la inactivación de *E. coli*, es el caso contrario, para este se sugiere resaltar la importancia de la concentración del desinfectante, sobre el tiempo de contacto a emplear, que de acuerdo con la Normatividad Mexicana, es más importante tener presente la inactivación de *E. coli*, ya que este parámetro se encuentra normado y los coliformes totales no.

Tabla 4. 3. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Watson Chick en PP1

Concentración n (mg/L)	Coliformes Totales			<i>E. coli</i>		
	k	Ecuación de ajuste	n	k	Ecuación de ajuste	n
0.025	10.159	y=-25.4950x-1.6244 r ² = 0.53	0.7908	-52.258	y=-37.1963x-0.1083 r ² = 0.9552	1.0028
0.1	13.875			-10.766		
0.175	34.936			-50.922		
0.275	29.122			0		
0.4	36.734			0		
0.5	28.144			-34.839		

La inactivación de los organismos control antes mencionado, también se visualiza en la Figura #, de forma general, para ambos casos se muestra un decaimiento de la población de estos en 0.1 y 0.5 mg/L dosificados, sin tener ningún rebote de crecimiento, esta última es la que ofrece ORP de 539 mV, valor que como ya se vio, inactivó los organismos control de la PP1, tal inactivación se buscó reflejar mediante las cinéticas obtenidas en esta dosificación, con velocidades k de -28.14 y -34.84 para coliformes totales y *E. coli*, respectivamente, dichos valores son se muestran diferentes a los reportados en la Tabla #, la confiabilidad del ajuste mostró un r² de 0.41 y 1 para cada caso sin embargo, es importante mencionar que este 1 fue obtenido al tener únicamente dos puntos que analizar, debido que el agente desinfectante actuó rápido sobre la población de organismos.

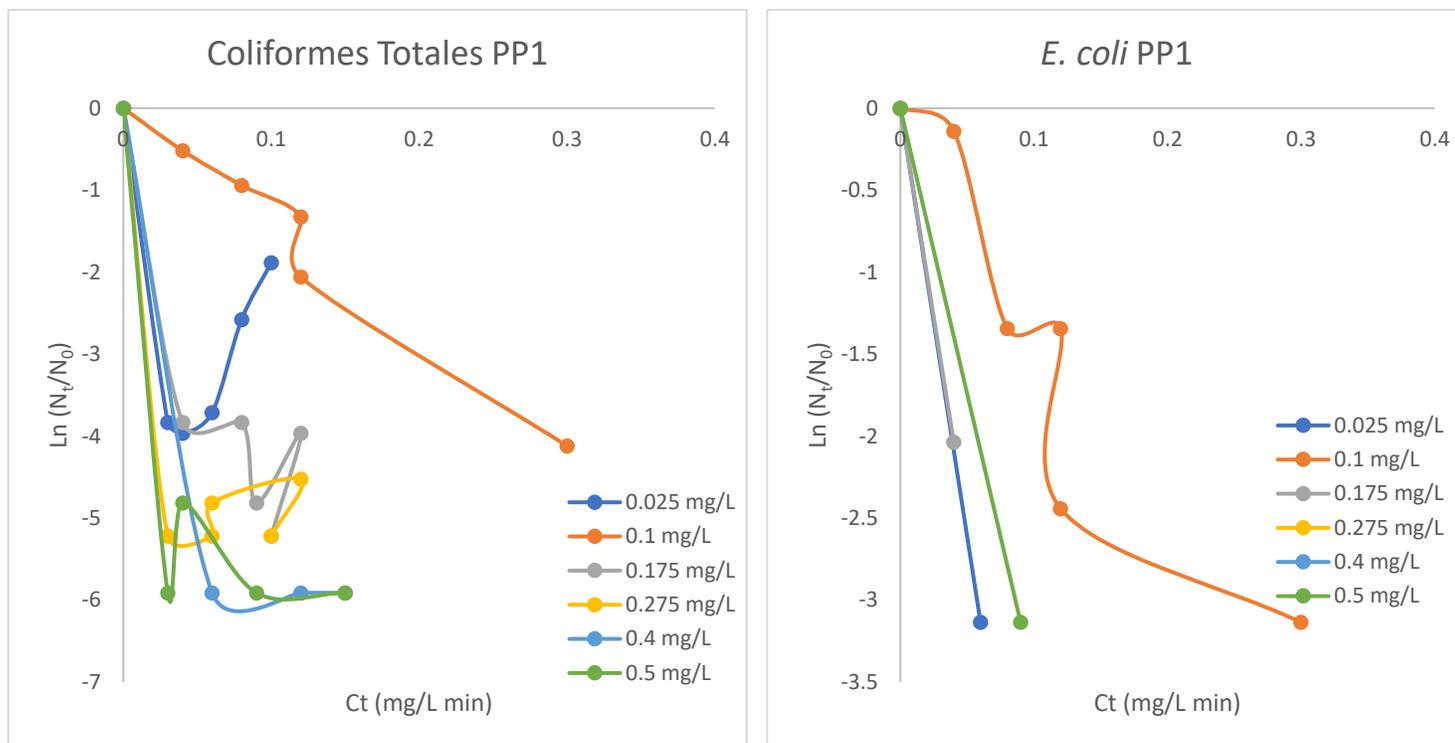


Figura 4. 24. Tasa de supervivencia de organismos control mediante el modelo de Watson Chick, en PP1

Por otra parte, el modelo de Watson Chick aplicado en la PP2, Tabla 4.4, mostró un ajuste de 0.5701 para coliformes totales y 0.6414 para *E. coli* con una velocidad k de -22.4613 y -14.4754 en cada caso que al igual que en los casos anteriores, los valores de inactivación de *E. coli*, fueron más altos con respecto a los de coliformes totales, y para ambos se mostró un $n < 1$, el cual sugiere la relevancia del tiempo de contacto sobre la concentración del desinfectante (By Lyndon & Gordon , 1998).

Tabla 4. 4. Inactivación de organismos control usando NaClO como medio desinfectante, ajuste mediante el modelo de Watson Chick en PP2

Concentración n (mg/L)	Coliformes Totales			<i>E. coli</i>		
	k	Ecuación de ajuste	n	k	Ecuación de ajuste	n
0.025	40.252	$y = -22.4613x - 1.9195$ $r^2 = 0.5701$	0.7628	6.689	$y = -14.4754x - 0.4794$ $r^2 = 0.6414$	0.6615
0.1	9.6936			2.7002		
0.175	16.53			42.619		
0.275	36.421			23.979		
0.4	14.324			0.5332		

0.5	17.547		10.332	
-----	--------	--	--------	--

Por su parte, la forma gráfica de la supervivencia de los organismos control, se mostró en la Figura #, donde existen rebotes de recrecimiento en prácticamente todas las concentraciones de cloro a las que fue sometida la muestra, con excepción de 0.1mg/L para coliformes totales y 0.175 mg/L para el caso de *E. coli* donde nuevamente se presenta la inquietud si la dosificación de 0.4 mg/L que sugirió presentar las condiciones de desinfección, es la más adecuada para emplearse como fija en el caso de la PP2, sin embargo, hay que recordar que la variación de fechas en las que fueron realizados los estudios de desinfección y los de cinéticas, fueron diferentes, y con ello su calidad de agua es variable en cada fecha de trabajo, tales condiciones se discuten en el apartado #. Por su parte para la dosificación de 0.4 mg/L, se obtuvo una velocidad k de -14.324 y -0.5332 en coliformes totales y *E. coli* respectivamente, y sus valores de ajuste r^2 fueron de 0.57 y 0.64, los cuales no se muestran confiables de forma estadística, finalmente se concentra un $n < 1$ para ambos organismos, y tal dato como en los casos anteriores, sugiere que el tiempo de contacto es más importante para la desinfección, sobre la concentración de desinfectante usada.

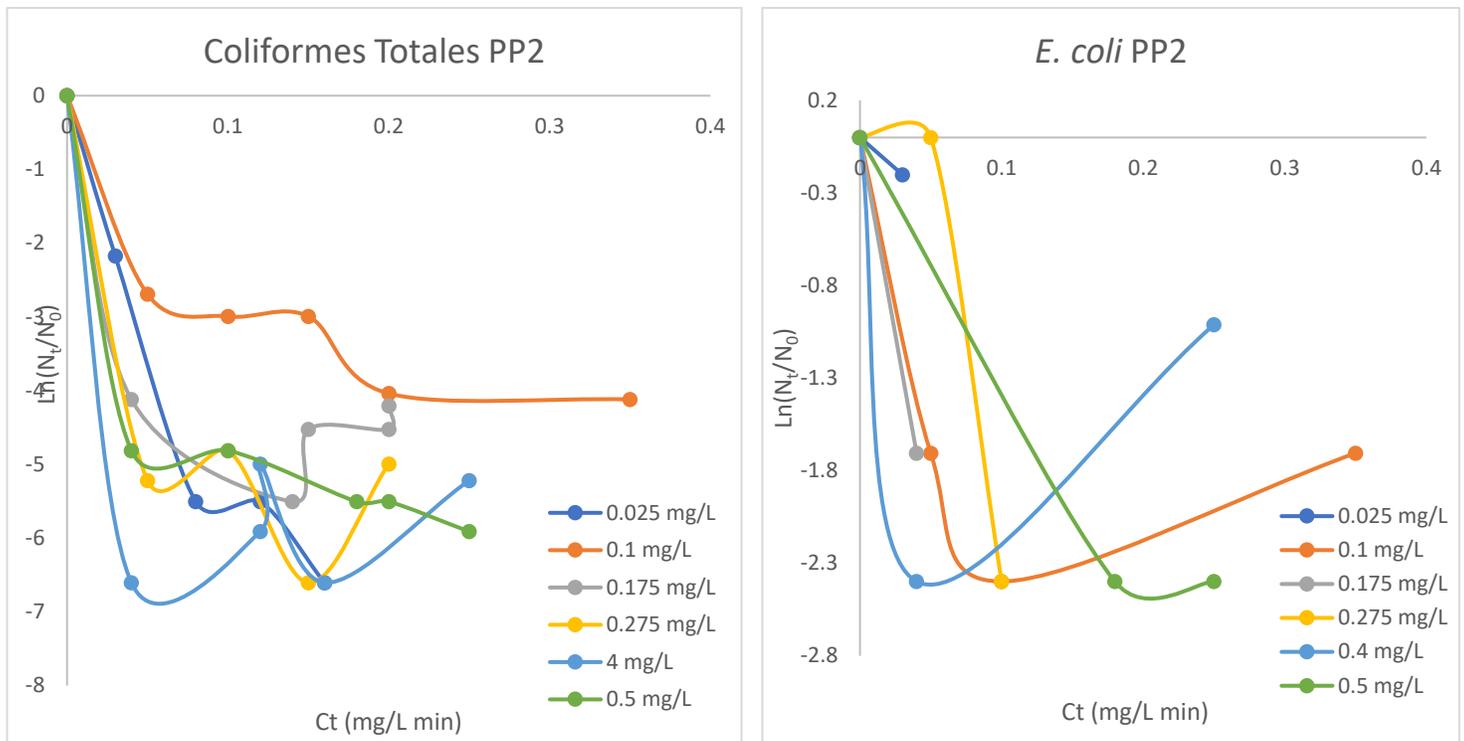


Figura 4. 25. Tasa de supervivencia de organismos control mediante el modelo de Watson Chick, en PP2

4.6.3 Recrecimiento bajo las condiciones favorables de desinfección

Como parte final del desarrollo de esta investigación, se obtuvieron las figuras siguientes, donde se muestra el posible recrecimiento de organismos patógenos tras ser sometidos a la dosificación seleccionada en cada PP donde se mostró inactivación de estos, que fueron de 0.5 mg/L para el caso de la PP1 y 0.4 mg/L para la PP2, y a diferencia de las pruebas experimentales pasadas, en esta se permitió variar el tiempo de contacto desde 5 min hasta 24 horas, durante el cual se tomaron muestras parciales y se registraron los valores obtenidos en los diferentes parámetros de importancia en la desinfección, como lo fueron ORP, pH, Cloro residual, coliformes totales y *E coli*.

De manera general, para todos los casos, se esperarí una inactivación del 100% sin la posibilidad de mostrar la supervivencia de estos, ni en el sistema de luz, ni en el de oscuridad, sin embargo, se mostró presencia, aún después de 24 horas, la razón de ello se atribuye al tiempo en el que

se realizaron estos estudios, que fue un año después de realizar los estudios de desinfección, resaltando la variabilidad de la calidad de agua entre un año y otro, aunque el sitio de toma de muestra fuera el mismo. Lo anterior puede atribuirse al periodo de actividad humana, para el año 2021, el país aún se encontraba con la mayoría de las restricciones sanitarias que impedían el desarrollo de las actividades recreativas en los dinamos, no siendo así para el presente año, en el que se ha declarado retomar diversas actividades de forma normal antes de iniciar con la pandemia mundial, y producto de ello incrementando el nivel de contaminación en agua, principalmente por coliformes totales y *E. coli*, que tuvo un aumento del 67.43% y 50.34%, respectivamente, inhibiendo las condiciones de desinfección preestablecidas, al no alcanzar los valores de ORP superiores a 500 mV, y resaltando la importancia de tomar el ORP como un indicador en el control de la desinfección de agua potable, sobre la concentración de cloro dosificada.

En la Figura #, se muestra el comportamiento que tuvieron los organismos control con respecto a la desinfección establecida con una dosificación de 0.5 mg/L en el punto AC de la PP1, donde se obtuvo un Ct promedio de 2.56 y 4.98, para coliformes totales y *E. coli*, en donde se observa un recrecimiento claro, principalmente en el sistema de luz, mostrando máximos durante todo el transcurso del tiempo de contacto, pero una inactivación del 97.69% y para el sistema de oscuridad del 96.62%, en cuanto a coliformes totales, ambas a los 40 minutos del tiempo de contacto, así el 92.85% en *E. coli* en ambos sistemas, pero hasta las 24 horas, enmarcando la prioridad del tiempo de contacto, sobre la desinfección, vista durante los resultados de las cinéticas.

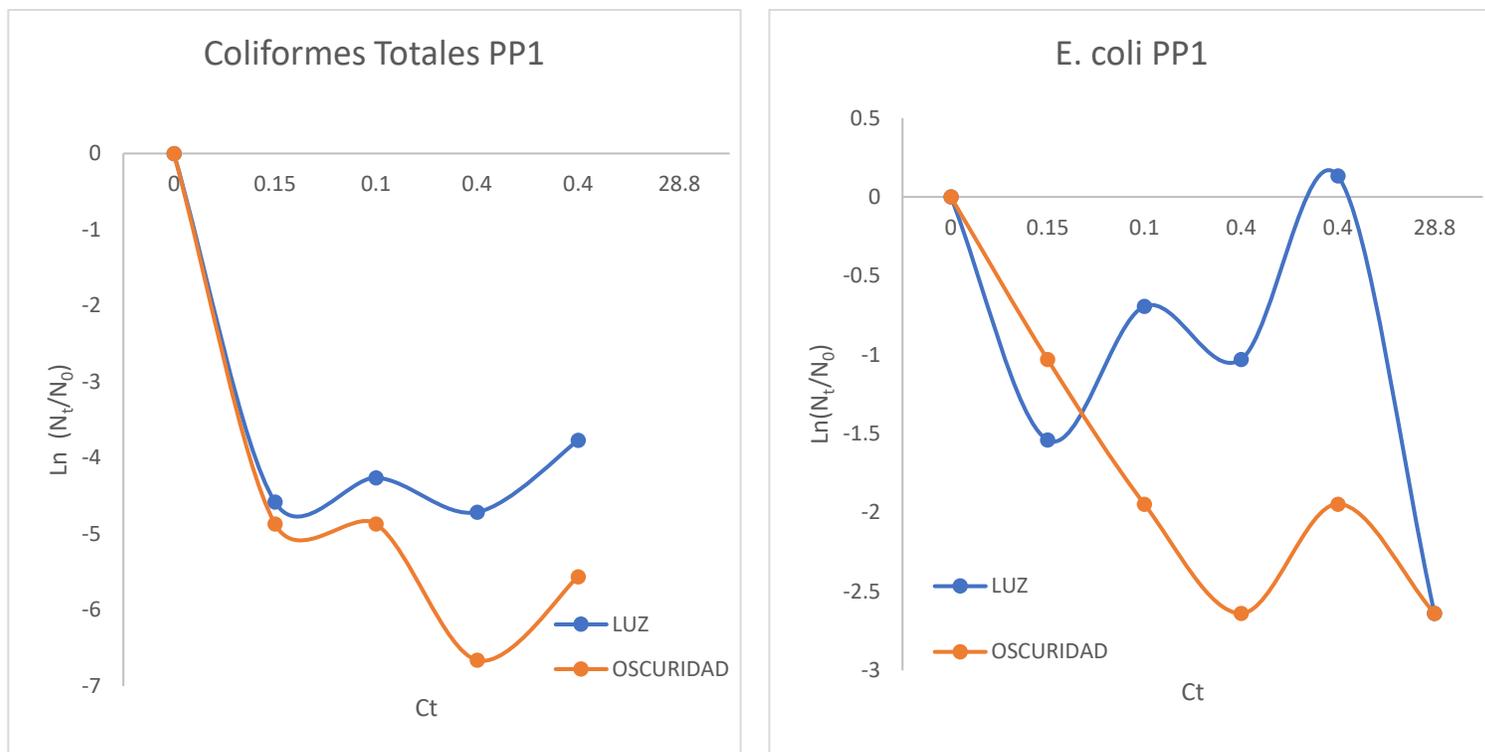


Figura 4. 26. Recrecimiento de patógenos en PP1

Y con respecto al agua sometida a desinfección y tomada del punto CR en la PP2, el principal recrecimiento se mostró en el sistema de oscuridad, con valores máximos durante estas curvas, y una inactivación del 95.56% y 87.09% para coliformes totales y *E. coli*, respectivamente, y para el sistema de luz, estos porcentajes fueron de 99.46 y 95.16 %. En ambos recrecimientos, estas inactivaciones se lograron a los 40 min en coliformes totales y 24 horas para *E. coli*, finalmente se obtuvo una relación Ct de 12.18 y 10.09 en cada caso, valores bastante altos, debido a este último tiempo de contacto.

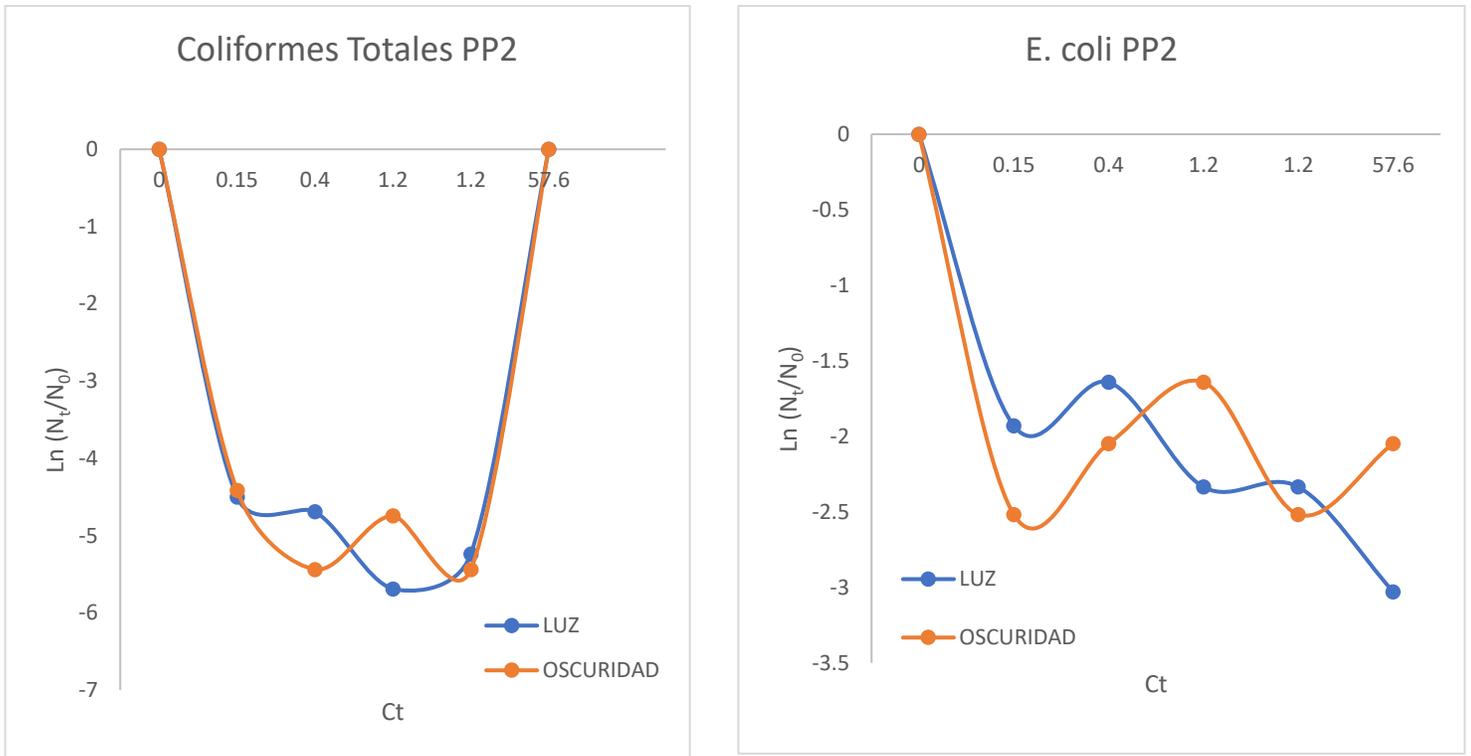


Figura 4. 27. Recrecimiento de patógenos en PP2

4.6.4 Compilación de los estudios experimentales realizados

Finalmente, se contempló la reunión de los resultados obtenidos en cada experimentación y de acuerdo al orden de ejecución, Tabla 4.5, en los que principalmente se enfoca la atención en aquellas dosificaciones en las que se mostró inactivación de organismos patógenos, 0.5 mg/L en PP1 y 0.4 mg/L en PP2, y un tiempo de contacto de 5 minutos, intentado mostrar, que el ORP puede ser una herramienta útil sobre la concentración de cloro y tiempo de contacto, en el control de la desinfección de agua potable. Todos los valores de esta Tabla fueron comparados con la normatividad vigente de agua potable en México.

En esta compilación se parte de las condiciones iniciales en cuanto a calidad de agua (agua cruda) en la que no se ha realizado ningún tratamiento de desinfección, en tal caso, no se debieron obtener valores en los que se evidenciar la presencia de cloro residual como los reportados todas las experimentaciones, con excepción de las cinéticas, donde se mostró 0 mg/L, se piensa que en este día de trabajo (octubre 2021) el agua no tuvo contacto alguno con cloro, y a pesar de ello, la población de

organismos patógenos, no se muestra incrementada con respecto al resto de las experimentaciones en las que si se presenció el cloro residual. Por otro lado, la ausencia de cloro en las muestras AC y CR, propició detectar valores de pH alcalinos de 9.33 y 9.88 (PP1 y PP2) respectivamente, esto puede atribuirse a que, al entrar el cloro en contacto con el agua, suele disociarse en HClO, especie que tiende a disminuir el pH de la muestra, y funciona bien como agente desinfectante (CONAGUA, 2019). Con respecto al ORP, en todas las condiciones de inicio el rango de valores reportado fue de 128 a 244 mV, valores en los que se piensa y evidencia, no logra la inactivación de patógenos (OMS, 1971).

Por otra parte, bajo las condiciones obtenidas para la desinfección, después de cada experimentación se mostró la presencia tanto de coliformes totales como de *E. coli* bajo diferidas circunstancias, señaladas en color rojo, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se establece que se logra inactivación con valores superiores a 600 mV de ORP, pH alrededor de 7.6 unidades y concentración de cloro residual de 0.05 mg/L, enmarcando la importancia de controlar las condiciones de desinfección, mediante el parámetro ORP.

Tabla 4. 5. Valores obtenidos de los estudios experimentales realizados, bajo las mejores condiciones de desinfección en cada PP

Estudios experimentales realizados		Dosificaciones (mg/L de Cl ₂)	ORP (mV)	Cloro residual (mg/L)	pH (U de pH)	Coliformes totales (UFC/ 100 mL)	<i>E. coli</i> (UFC/ 100 mL)
LMP NOM-127-SSA1-2021			650*	0.2-1.5	6.5-8.5	-	<1
Estándar de referencia		0	242	0.04	7.53	738	86
		0.5	613	0.07	7.6	0	0
Desinfección simulada	PP1	0	244	0.04	7.32	738	30
		0.5	539	0.05	7.92	0	0
	PP2	0	225	0.08	7.26	738	8
		0.4	523	0.09	7.93	0	0
Cinéticas de desinfección	PP1	0	197	0	9.33	738	46
		0.5	452	0.03	9.27	2	0
	PP2	0	245	0	9.88	738	22
		0.4	555	0.04	9.75	1	0
Recrecimiento simulado	PP1	0	187	0.06	7.9	1560	28
		0.5 luz	198	0.03	7.82	16	6

		0.5 oscuridad	194	0.01	7.98	12	10
	PP2	0	128	0.02	8.15	4140	124
		0.4 luz	214	0.03	7.66	46	18
		0.4 oscuridad	108	0.03	7.82	50	10

*Valor tomado de OMS, (1971)

4.7 Tratamiento Estadístico

4.7.1 Análisis de Varianza con respecto a la propuesta del estándar de referencia

Al análisis de varianza que se realizó para cada uno de los parámetros medidos, compara la calidad FQyB inicial en los sitios de muestreo AC y CR, cuyos resultados indicaron que no hay diferencia estadísticamente significativa con valor de $P=0.4793$, Tabla 4.6, mayor que el valor de α (0.05) y por lo tanto no se rechaza H_0 , de tal forma que el estándar de referencia es válido como punto de partida para establecer las condiciones de desinfección simulada en cada PP.

Tabla 4. 6. Resultados del ANOVA realizado con respecto a la calidad del agua FQyB determinada en los puntos AC (PP1) y CR (PP2)

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	6742772.6	25	269710.904	75.2120287	2.0096E-55	1.61210344
Columnas	1807.46273	1	1807.46273	0.50403205	0.47932265	3.93243783
Interacción	118878.983	25	4755.15932	1.32603159	0.16321987	1.61210344
Dentro del grupo	372944.787	104	3586.00756			
Total	7236403.83	155				

4.7.2 Análisis de Varianza con respecto a la evaluación de los sistemas de desinfección en cada PP

El análisis siguiente, mostró el funcionamiento del sistema de desinfección que actualmente se emplea en la PP1, donde se obtuvo un valor de $P=0.0008357$, Tabla 4.7, donde este es menor que el nivel de significancia α , de tal forma que se rechaza H_0 , indicando existen diferencias significativas entre la calidad del agua de entrada a la PP1

(punto AC), y la calidad del agua resultante después del proceso de desinfección con cloro, evidenciando el funcionamiento de este.

Tabla 4. 7. Resultados del ANOVA realizado en el proceso de desinfección con cloro el punto ED, con respecto al influente en el punto AC de la PP1

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	2933493.78	5	586698.756	78.5563228	6.2546E-22	2.40851412
Columnas	146856.53	3	48952.1765	6.55447611	0.00083572	2.79806064
Interacción Dentro del grupo	1514589.57	15	100972.638	13.5197818	1.9786E-12	1.88017458
Total	358488.525	48	7468.51094			
Total	4953428.41	71				

Por su parte, el proceso de desinfección evaluado en la PP2 mediante el ANOVA, mostró que existen diferencias significativas entre los tratamientos, la calidad del agua en el punto CR y la obtenida tras la desinfección en la PP, rechazando H_0 con un valor $P=0.02621$, Tabla 4.8.

Tabla 4. 8. Resultados del ANOVA realizado en el proceso de desinfección con cloro el punto ECD, con respecto al influente en el punto CR de la PP2

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	2296203.43	5	459240.687	45.2262923	1.5568E-14	2.47716867
Columnas	81965.4504	2	40982.7252	4.03600282	0.02621286	3.25944631
Interacción Dentro del grupo	700633.368	10	70063.3368	6.89987851	6.5426E-06	2.10605391
Total	365554.28	36	10154.2856			
Total	3444356.53	53				

4.7.3 Análisis de Varianza con respecto a la desinfección simulada para PP1 y PP2

Con respecto a la desinfección simulada realizada en el laboratorio, mediante el análisis de varianza, Tabla 4.9, se encontró un valor de $P=0.6104$ mayor que α , donde este no rechaza H_0 y muestra que no existen

diferencias entre el agua muestreada en el punto AC y el proceso de desinfección al que fue sometida, sin embargo, los resultados de los parámetros medidos como lo son el ORP, Cloro residual libre, pH, coliformes totales y *E. coli*, muestran que el agua es segura para uso y consumo humano de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, la razón de tal inconsistencia puede deberse a que se requiere de un mayor número de datos para que este tipo de análisis se muestre confiable.

Tabla 4. 9. Resultados del ANOVA realizado en la desinfección simulada con cloro del punto AC, con respecto a la calidad FQyB determinada en el agua muestreada del mismo punto en la PP1

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	18595.2387	1	18595.2387	0.27644984	0.61049813	4.96460274
Dentro de los grupos	672644.224	10	67264.4224			
Total	691239.463	11				

Por su parte, el proceso de desinfección realizado en laboratorio del punto CR, muestra las mismas características del ANOVA de la Tabla #, donde en este caso el valor de $P=0.6267$, Tabla #, no rechazando H_0 , sin embargo, tal parecido, enmarca que los datos de calidad inicial medidos para cada PP, so bastante similares, reforzando el ANOVA obtenido en la Tabla 4.10.

Tabla 4. 10. Resultados del ANOVA realizado en la desinfección simulada con cloro del punto CR, con respecto a la calidad FQyB determinada en el agua muestreada del mismo punto en la PP2

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	16673.1075	1	16673.1075	0.25170492	0.6267378	4.96460274
Dentro de los grupos	662406.904	10	66240.6904			
Total	679080.011	11				

4.7.4 Análisis de Superficie de Respuesta para obtención de las mejores condiciones de desinfección.

Como parte final del análisis de datos, se obtuvieron gráficos de superficie de respuesta que indicaron las mejores condiciones de desinfección en coliformes totales y *E. coli*. Para la PP1, las mejores condiciones se representaron con un máximo en valores de ORP de 497 y 458 mV, respectivamente, así como con un cloro residual libre de 0.05 mg/L en ambos casos y la inactivación total de los organismos, Figura #.

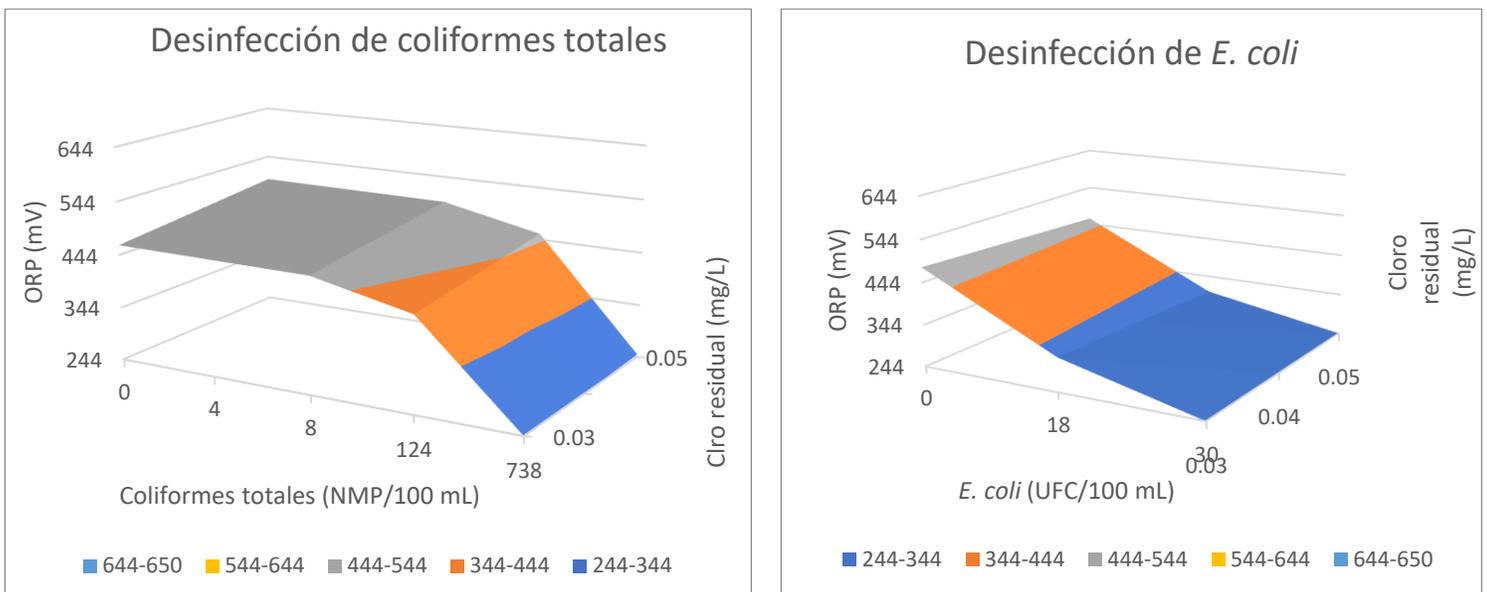


Figura 4. 28. Superficies de respuesta obtenidas, para determinar las mejores condiciones en la desinfección de coliformes totales, y *E. coli* en PP1

Por su parte en la PP2, el máximo obtenido en los gráficos de la Figura #, se reportaron valores de ORP de 490 mV para la inactivación de coliformes totales y 479 mV para *E. coli*, con una concentración de cloro residual libre de 0.1 mg/L.

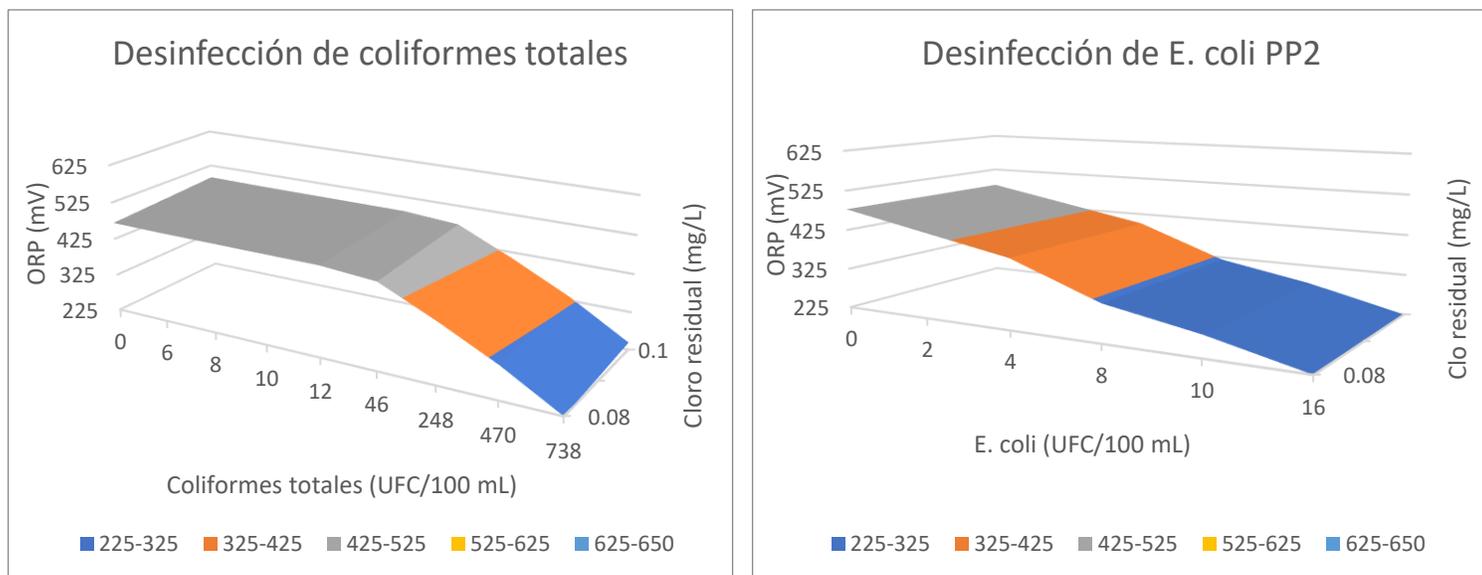


Figura 4. 29. Superficies de respuesta obtenidas, para determinar las mejores condiciones en la desinfección de coliformes totales, y *E. coli* en PP2

El análisis de superficie de respuesta enfatiza usar el ORP como herramienta de control en los sistema de desinfección de las PP, ya que las mejores condicones de desinfección, sugirieron emplear valores de ORP superiores a los 458 mV logrando una inactivación al 100% de coliformes totales y de *E. coli*, sin embargo las concentraciones obtenidas de cloro residual libre no se encuentran dentro de la sugerencia de los LMP en la NOM-127-SSA1-2021 al usar concentraciones menores a 0.5 mg/L en la dosificación de cloro para la desinfección simulada, lo que implicaría aumentar la dosis para alcanzar los LMP, siempre que el ORP no rebase los 650 mV (OMS, 1971).

5 CONCLUSIONES

Se establecieron las condiciones favorables de operación en los sistemas de desinfección del agua mediante cloración, en las Plantas Potabilizadoras Río Magdalena 1 y 2 en las que, el Potencial Óxido Reducción, sirvió como herramienta para ello, manteniendo la ausencia de Coliformes totales y *E. coli*, en un intervalo de valores de 410 a 613 mV dentro de un pH de 7.6 a 7.9, siempre y cuando la población inicial de organismos no sea mayor a 738 y 86 UFC/100 mL, respectivamente.

La consulta de la calidad histórica FQyB reportada durante el año 2018 en el influente y efluente de las PP, permitió enfatizar la importancia que se le debe dar a los monitoreos programados, los cuales no son posibles debido a la falta de insumos y recursos económicos para el mantenimiento y vigilancia del funcionamiento de las PP en la CDMX sin embargo, la consulta de estos datos guiaron la selección de parámetros que se determinaron y evaluaron al inicio de las pruebas de desinfección con un total de 27 parámetros, la mayoría de ellos regulados en la NOM-127-SSA1-2021 con excepción del ORP sugerido por la OMS (1971) y entre ellos los parámetros que aportaron actividad significativa en la desinfección simulada fueron, ORP, Cloro residual, pH, Coliformes totales y *E. coli*.

- El diagnóstico de la calidad del agua mostró que, en ambas PP, en los influentes y durante el proceso de potabilización el agua no fue apta para el uso y consumo humano, pero al pasar por un sistema de desinfección, esta se volvió segura con valores de ORP superiores a 674 mV y no necesariamente cuidando la concentración de cloro residual libre, como lo estipula los LMP de la NOM-127-SSA1-2021.
- Por otra parte, para los puntos muestreados en la PP1 se incumplieron los LMP en algunos parámetros, como en la turbiedad donde el intervalo de valores medidos fue de 6.44 a 7.76 NTU, por otra parte, en el punto AC, se detectaron 738 y 253 UFC/100 mL de coliformes totales y *E. coli* contando con una concentración de cloro residual de 0.1 mg/L y un ORP de 321 mV como máximo. Posteriormente en el punto ITF se obtuvo una concentración de cloro residual libre de 2.1 mg/L con ORP de 659 mV cuyos datos consisten con la cercanía a la oxidación con cloro previa. Finalmente, en el ID se detectó una concentración alta de 13 mg/L de NO_3^- ; la cual

no representó ningún peligro para la salud, al final del proceso de desinfección.

- Y con respecto a los puntos monitoreados en la PP2, la turbiedad concentró sus valores máximos en los CR y EFD con 9.61 y 10.06 NTU así como la presencia de coliformes totales y *E. coli* de 700 y 6 UFC/100 mL y 389 y 4 UFC/100 mL en los mismos puntos, también se presentaron concentraciones altas de manganeso en un intervalo de 0.3 a 0.5 mg/L durante todo el proceso de potabilización y posterior desinfección, donde hay que tener especial cuidado ya que la ingesta de niveles altos en agua, afecta el desarrollo del cerebro de los niños.

Con ayuda del estándar de referencia fue posible establecer las condiciones de trabajo para obtener los puntos de quiebre establecidos en las dosificaciones de 0.175 y 0.275 mg/L, obteniéndose cloro residual libre de 0.03 y 0.08 mg/L durante las desinfecciones simuladas en la PP1 y PP2 respectivamente, en los cuales se mostró que durante la máxima reducción del cloro los valores de ORP resultantes fueron de 292 y 478 mV, en los que la población de Coliformes totales y *E. coli* fue de 8 y 0 UFC/100 mL para ambas PP, sin embargo cuando este punto se logra pasar y comienza a aumentar la concentración de cloro residual libre, se muestra ausencia de los organismos en 0.5 y 0.4 mg/L, puntos finales de la desinfección en valores de ORP de 523 a 547 mV en las dos PP, mostrando así que existe una relación entre valores altos del parámetro de ORP y la inactivación de los organismos donde los valores de cloro residual libre medidos fueron de 0.05 y 0.09 mg/L.

Las cinéticas de desinfección obtenidas a través de los modelos Chick y Watson Chick, establecieron la optimización del proceso de la desinfección simulada mediante el uso de las mejores condiciones de desinfección antes mencionadas, en las que destaca la importancia del tiempo de contacto sobre la concentración del desinfectante, estas también se ajustaron a los modelos en función de la tasa de supervivencia de los coliformes totales y *E. coli* a través de un intervalo de tiempo de 5 min a 24 horas.

- Bajo estas condiciones y con una dosificación de trabajo de 0.5 mg/L en la PP1, se alcanzó una remoción de 99.72 y 95.65%, en donde para el modelo de Chick, se reportaron velocidades generales de inactivación k de 0.7235 y 1.1932 siendo esta última más grande para *E. coli* con un ajuste en r^2 de 0.51 y 0.99 respectivamente. Con respecto al modelo de Watson Chick, las velocidades de inactivación k fueron de 25.5 y 37.2, su ajuste de regresión r^2 presentó los valores 0.53 y 0.95, respetando el esquema anterior con respecto a los

resultados obtenidos en *E. coli*, que fueron mayores en comparación con coliformes totales.

- Para el caso de la PP2, empleando la dosificación de trabajo de 0.4 mg/L se obtuvo una remoción de 99.45% y 63.63% en coliformes totales y *E. coli*, respectivamente, en los que el modelo de Chick reportó valores k generales de 0.9 y 0.57 y ajustes en r^2 de 0.55 donde $n < 1$, posicionando al tiempo de contacto sobre la concentración del desinfectante, por otra parte, en el modelo de Watson Chick las velocidades de inactivación k fueron de 22.46 y 14.5 con ajustes en r^2 de 0.57 y 0.64 y $n < 1$.
- Finalmente, el coeficiente de dilución que expresa la eficiencia bactericida del desinfectante reportó valores de $n < 1$ que enmarcan la importancia que tiene el tiempo de contacto sobre la concentración del desinfectante para todos los casos vistos anteriormente, con la única excepción en la PP2 en el modelo Watson Chick donde para el caso de *E. coli*, el coeficiente fue mayor a 1 ($n > 1$), estableciendo en este modelo y patógeno que la concentración fue más importante sobre el tiempo de contacto.

Mediante el análisis de superficie de respuesta, se determinó la potencialidad del parámetro ORP como herramienta de control útil en los sistemas de desinfección en donde el establecimiento de las mejores condiciones en las que se mostró ausencia de organismos, correspondió a un máximo del parámetro ORP con un intervalo de valores de 410 a 490 mV al emplear dosificaciones de cloro menores a 0.5 mg/L, y manteniendo la ausencia tanto de coliformes totales como de *E. coli*, sin embargo, y aunque no se logró alcanzar la concentración de cloro residual sugerida en la NOM-127-SSA1-2021, se muestra que no es necesario sobreclorar las PP para llevar a cabo la inactivación de estos organismos, únicamente vigilar que el valor de ORP no baje de este intervalo otorgado y sin llegar a rebasar la sugerencia de 650 mV de la OMS (1971). Por otro lado, para todos los casos se observó que existió una alteración significativa en la variable de respuesta final (ORP), debido a la interacción entre la presencia del cloro residual libre, y la supervivencia de los organismos.

6 REFERENCIAS

ACOUATECNOLOGÍA, 2021. *ACOUA TECNOLOGÍA INGENIERÍA EN TRATAMIENTO DE AGUA Y PROCESOS*. [En línea] Available at: <http://acquatecnologiaperu.com/potencial-redox.html> [Último acceso: 9 enero 2021].

Aeas, 2012. *MANUAL DE LA CLORACIÓN*. España: Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento.

Almeida Lereño, L., Carmona Jiménez, J. & Cantoral Uriza, E. A., 2018. *HISTORIA NATURAL Y CULTURAL DE LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA*. Ciudad de México, México. 1a ed. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 978-607-30-0914-0.

APHA, 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Vigésima primera edición 21a ed. ed. s.l.:American Public Health Association. American Water Works Association, Water Environmental Federation (APHA). United Book Press.

Aziz Pico, M. & Ortega Flores, J., 2020. *MEJORA REGULATORIA EN MATERIA DE AGUAS RESIDUALES Y CALIDAD DE AGUA: VOL. 1. Reporte de visitas a las cuencas del río Santiago, Atoyac y Magdalena*, Ciudad de México: Comisión Nacional de Mejora Regulatoria CONAMER, Secretaria de Economía.

By Lyndon, L. G. & Gordon, R. F., 1998. Modeling Water Treatment Chemical Disinfection Kinetics. *Journal of Environmental Engineering*, Volumen 124, pp. 783-793.

Campos López, A., 2015. *Tesina. POTABILIZACIÓN DEL AGUA PARA SUMINISTRO EN LA CIUDAD DE MÉXICO*. México : UNAM, Facultad de Ingeniería, Programa Único de Especializaciones de Ingeniería, Campo de Conocimiento: Ingeniería Civil.

Cañizares Macías, M. d. P. & Duarte Lisci, G. A., 2012. *Fundamentos de química analítica. Teoría y ejercicios*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Chick, H., 1908. An Investigation of the Laws of Disinfection. *Jenner Research Student, Lister Institute of Preventive Medicine*, Volumen 8, pp. 92-158.

Chick, H., 1908. An investigation of the laws of disinfection. *Publised online by Cambrige University Press: 15 May 2009. Epidemiology & Infection*, 8(1), pp. 92-158.

CONAGUA, 2007. *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. DESINFECCIÓN PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO*. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA, 2017. *Gobierno de México*. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/que-es-una-planta-potabilizadora?idiom=es>

CONAGUA, 2018 B. *ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO*. México: SEMARNAT CONAGUA.

CONAGUA, 2018. *CONAGUA*. [En línea] Available at: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/563375/Inventario_2018.pdf

CONAGUA, 2018. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratameinto de Aguas Residuales. Pretratamiento y Tratamiento Primario*. Libro 46 ed. México: CONAGUA.

CONAGUA, 2019. *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. DESINFECCIÓN PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO, LIBRO 23*. México: s.n.

CPEUM, 2011. *Cámara de Diputados*. [En línea] Available at: http://www3.diputados.gob.mx/camara/001_diputados/012_comisioneslxii/01_ordinarias/002_agua_potable_y_saneamiento/13_marco_juridico/01_constitucion_politica_de_los_estados_unidos_mexicanos [Último acceso: 13 febrero 2019].

Darnell, M. S., Feinstone, S. & Taylor, D., 2004. Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV. *J Virol Methods*, 121(6).

de Vargas, L., 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I*. Lima: Organización Panamericana de la Salud (OPS), Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

del Barrio de Vergara, M., 2015. *TRABAJO FIN DE GRADO: CLORACIÓN FRENTE A OZONACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE AMBOS PROCESOS*. s.l.:s.n.

Edberg, S. C., Rice, E. W., Karlin, R. J. & Allen, M. J., 2000. Escherichia coli: The Best Biological Drinking Water Indicator for Public Health Protection. *Journal of Applied Microbiology*, Volumen 88, pp. 106-116.

Ellis, K. V., 1991. Water disinfection: A review with some consideration of the requirements of the third world. *Critical Reviews in Environmental Control*, 20(5-6), pp. 341-407.

European CDC, 2020. *Disinfection of Environments in Healthcare and Non-healthcare Settings Potentially Contaminated With SARS-CoV-2*. ECDC Stockholm: s.n.

Fagundo Castillo, J. R., González, H. P., Muñoz, S. M. & Melián Rodríguez, C., 2005. RELACIONES ENTRE POTENCIALES REDOX Y CONCENTRACIONES DE SULFUROS EN AGUAS TERMALES DE CUBA. *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, Volumen 6, pp. 31-44.

Fonseca González, G., Avendaño, E. & Leonardo Araque, A., 2014. Monitoring of pH, redox and turbidity in water treatment plant using WSN (Wireless Sensor Networks) chit ZIGBEE technology. *Escuela de Ingeniería Electrónica, UPTC*, 14(1), pp. 17-21.

González Reynoso, A. E., Hernández Muñoz, L., Perló Cohen, M. & Zamora Saenz, I., 2010. *Rescate de ríos urbanos. Propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos*. México-ISBN: 978-607-02-0721-1: Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad.

González Sánchez, Á. E., 2018. *Evaluación de la efectividad de distintos desinfectantes oxidantes en el lavado industrial de melón mediante el control del Potencial de Oxidación REDUCCIÓN en la pila*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Química, Proyecto de graduación sometido a la consideración de la Escuela de Ingeniería

Química como requisito final para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Gutiérrez Pulido, H. & de la Vara Salazar, R., 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda ed. México: Mc Graw Hill Interamericana.

Hybrid, 2021. *Potencial de reducción de oxidación (ORP). Una herramienta nueva para evaluar el tratamiento del agua: Hoja informativa*. s.l.:Hybrid A Hendrix Genetics Company.

Jaramillo Cazco, C. N., 2010. *DESINFECCIÓN DEL AGUA PARA USO HUMANO. PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN INGENIERO CIVIL*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental. Desinfección del Agua para Uso Humano.

Jiménez, C. B., Torregrosa y Armentia, M. L. & Aboites Aguilar, L., 2010. *EL AGUA EN MÉXICO: CAUSES Y ENCAUSES*. Primera ed. MÉXICO: ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS.

Juárez Lugo, C. S., 2015. *Análisis de Varianza de Tipo I: Anova I. Problemario de Estadística Aplicada*. Primera Edición ed. Ecatepec, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario Ecatepec.

Lai, M., Cheng, P. & Lim, W., 2005. Survival of severe acute respiratory syndrome coronavirus.. *Clin Infect Dis.*, 41(7), pp. 67-71.

Legorreta, J., 2006. *EL AGUA Y LA CIUDAD DE MÉXICO. De Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI*. México: (c) Universidad Autónoma Metropolitana.

Legorreta, J., 2009. *Ríos, lagos y manantiales del Valle de México*. 1º ed. México: Universidad Autónoma Metropolitana, Gobierno del Distrito Federal, 365 pp..

Li, T. y otros, 2022. Chlorination in the pandemic times: The current state of the art for monitoring chlorine residual in water and chlorine exposure in air. *Science of the Total Environment*, 838(3), pp. 2-11.

Luque Torrez, H., 2018. *CUANTIFICACIÓN DE CLORO RESIDUAL EN AGUA POTABLE Y SU INHIBICIÓN CON TIOSULFATOS*. La Paz Bolivia:

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS. FACULTAD DE CIENCIA PURAS Y NATURALES CARRERA DE CIENCIAS QUÍMICAS.

Macizo, M., 2007. La desinfección del agua con cloro. En: U. P. d. Cataluña, ed. *Gestión e la Calidad del Agua Curso 2006-2007*. Barcelona: Gestión de la Calidad del Agua Sección de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, p. 58.

Magaña Lopez, R., 2018. *#EFECTO DE LA PLATA, COBRE, HIERRO Y AGREGADOS MINERALES SOBRE HUEVOS DE HELMINTO Y SU POTENCIAL USO EN UN SISTEMA DE FILTRACIÓN*". México: Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental)-(Agua).

Marcó Gratacós, J., 2014. *HISPAGUA. Generadores de cloro por electrólisis de salmuera con tecnología de célula con membrana*. [En línea] Available at: https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_documento/procesos-y-sistemas-generadores-cloro-electrolisis-salmuera-tecnoaqua-es.pdf [Último acceso: 07 junio 2021].

Metcalf, 1996. *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*.. Vol. 1 ed. s.l.:MacGraw Hill.

Miranda Rios, M., 2005. *Estudio y evaluación del poder germicida de compuestos de plata en aguas residuales parcialmente tratada*.. México: Tesis Maestría, UNAM, Facultad de Química, UNAM.

Monsivais Montoliu, B., 2014. *PROGRAMA DE RESCATE INTEGRAL DEL RÍO MAGDALENA EN MÉXICO D.F.*. Barcelona: Máster en Sostenibilidad- Instituto de Sostenibilidad- Universidad Politécnico de Cataluña.

Montgomery, D. C., 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Segunda edición ed. Arizona: LIMUSA WILEY.

Newman, S. E., 2004. *Desinfecting Irrigation Water for Disease Management*, San José, California: 20 th Annual Conference on Pest Management on Ornamentals Society of American Florists.

Olmedo Sánchez, M. T., 2008. Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. *Higiene y Sanidad Ambiental* , Volumen 8, pp. 335-342.

OMS, 1971. *INTERNATIONAL STANDARDS FOR DRINKING-WATER*. Third Edition ed. Ginebra: Worl Health Organization .

OMS, 2006. *Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición. Volúmen 1. Recomendaciones*. Tercera edición ed. s.l.:Organización Mundial de la Salud.

OMS, 2017. *Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua de consumo humano. Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Ginebra.. [En línea] Available at: [\(https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/es/\)](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/es/).

OMS, 2020. Agua, saneamiento, higiene y gestión de desechos en relación con el SARS-CoV-2, el virus causante de la COVID-19. Orientaciones provisionales.. *Organización Mundial de la Salud, unicef para cada niño*, pp. 1-13.

OMS, 2020. *Organización Mundial de la Salud. Transmisión del SARS-CoV-2: repercusiones sobre las precauciones en materia de prevención de infecciones*.. [En línea] Available at: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/333390/WHO-2019-nCoV-Sci_Brief-Transmission_modes-2020.3-spa.pdf?

OPS & OMS, 1996. *La calidad del agua potable en América Latina. Ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química*. Washington D. C. : Ilsi Press.

PAHO, 2020. *Handwashing while conserving water*. [En línea] Available at: <https://www.paho.org/en/news/12-5-2020-video-paho-barbados-psa-handwashing-and-saving-water-during-covid-19-pandemic>.

PANACHLOR, 2021. *Safe Water*. [En línea] Available at: <http://safewatersas.com/potencial-de-oxidacion-reduccion-orp-redox/>
[Último acceso: 21 junio 2021].

Pérez López, J. & Espígares García, M., 1995. *Estudio sanitario del agua. Desinfección del agua. Cloración*. Granada, España: Universidad de Granada.

PUREWATER, 2019. *PURE WATER. Potencial de oxidación-reducción ORP (redox)*. [En línea] Available at: <https://purewater.com.co/category/agua-potable/minerales/> [Último acceso: 10 enero 2021].

Ramírez Quirós , F., 2010. Subproductos generados en la desinfección del agua. *Técnica Industrial* , Volumen 288, pp. 44-53.

Rosero, M., Latorre, J., Torres, W. & Delgado , L., 2004. PRESENCIA DE MATERIA ORGÁNICA Y SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCIÓN CON CLORO. CASO SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO, PUERTO MALLARINO, CALI-COLOMBIA. *Seminario Internacional: Visión Integral en el Mejoramiento de la Calidad del Agua*, pp. 1-10.

Rubio Hurtado, M. J. & Berlanga Silvete, V., 2012. Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. Caso Práctico. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació. REIRE ISSN: 18886-1946*, 5(2), pp. 83-100.

Tomaylla Berrocal, N. J., 2017. *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CLORACIÓN POR GOTEO EN LA DESINFECCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO DE LA COMUNIDAD DE CAPILLAPATA- LOS MOROCHUCOS- CANGALLO, AYACUCHO*. Ayacucho- Perú: Universidad Nacional de San Cristóbla de Huamanga. Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia. Escuela Profesional de Ingeniería Química.

Trevor, V. & Suslow, P., 2004. Introduction to ORP as the Standard of Postharvest Water Disinfection Monitoring.. *Vegetable Research and Information Center*, Volumen 2.

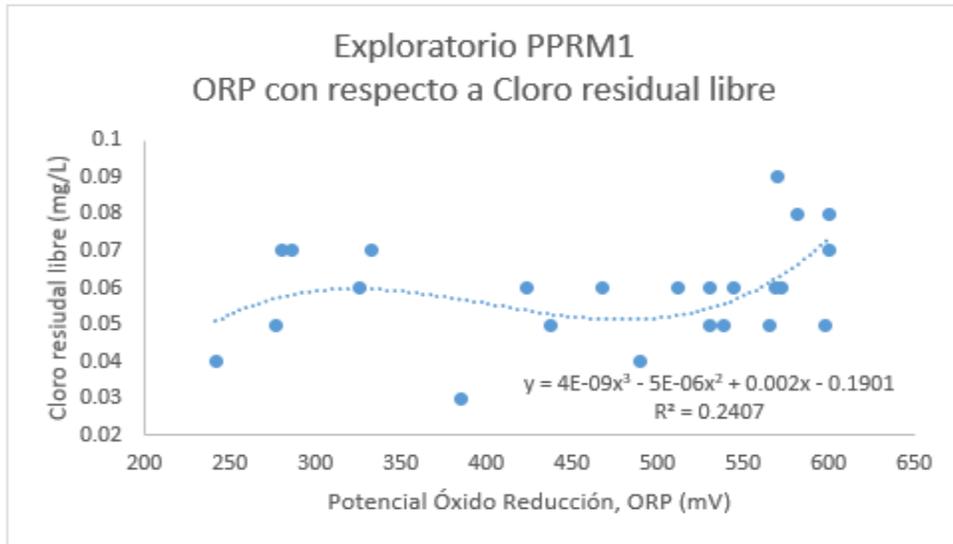
UNAM, 2009. El río Magdalena. Un delta de historia en la ciudad. *Revista Humanidades y Ciencias Sociales*, Issue 40.

UNAM, GDF & SMA, 2008. *Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del Río Magdalena*. México: UNAM.

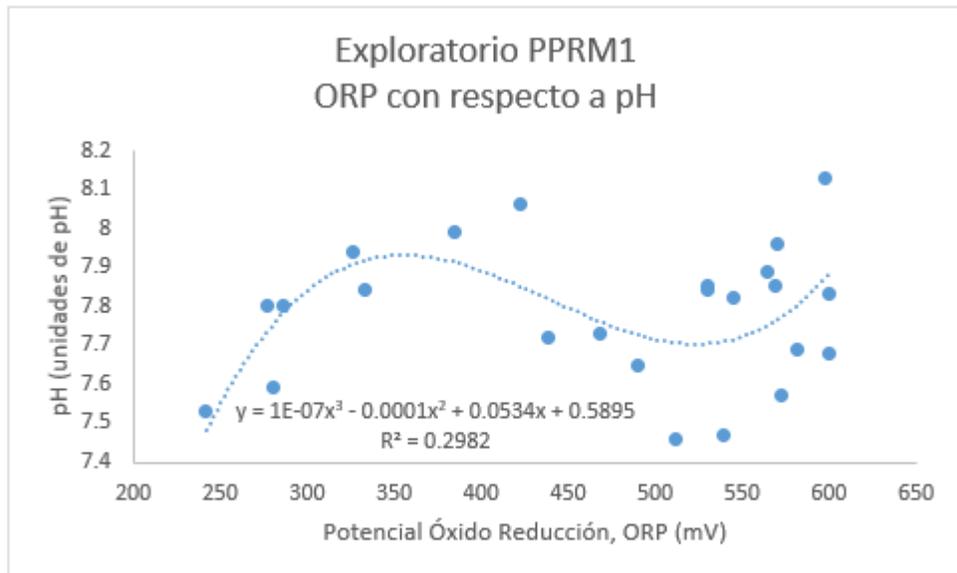
ANEXOS

A1. Relaciones entre los parámetros medidos y el Potencial Óxido Reducción

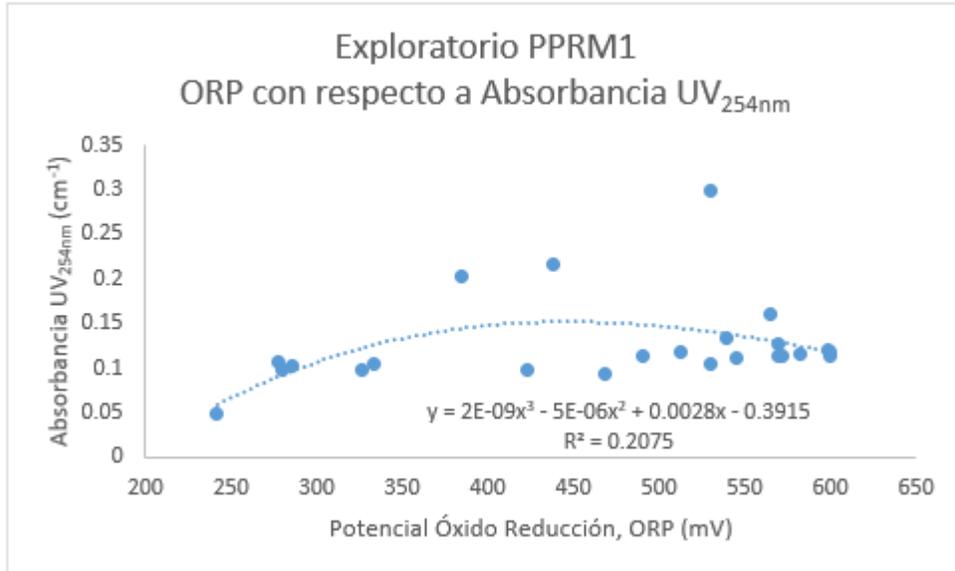
A1.1 Análisis en muestreo Exploratorio Planta Potabilizadora Río Magdalena 1



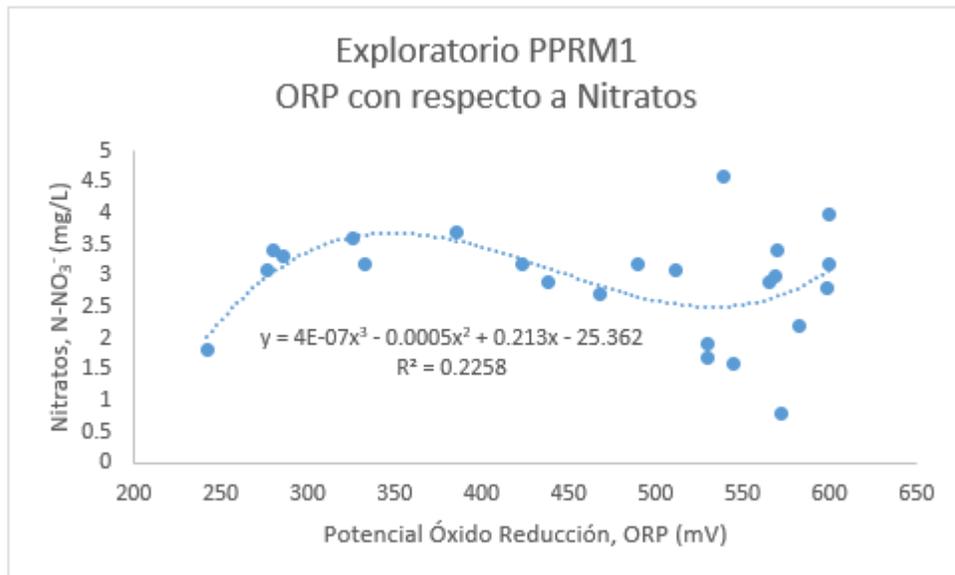
A1. 1. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Cloro residual libre



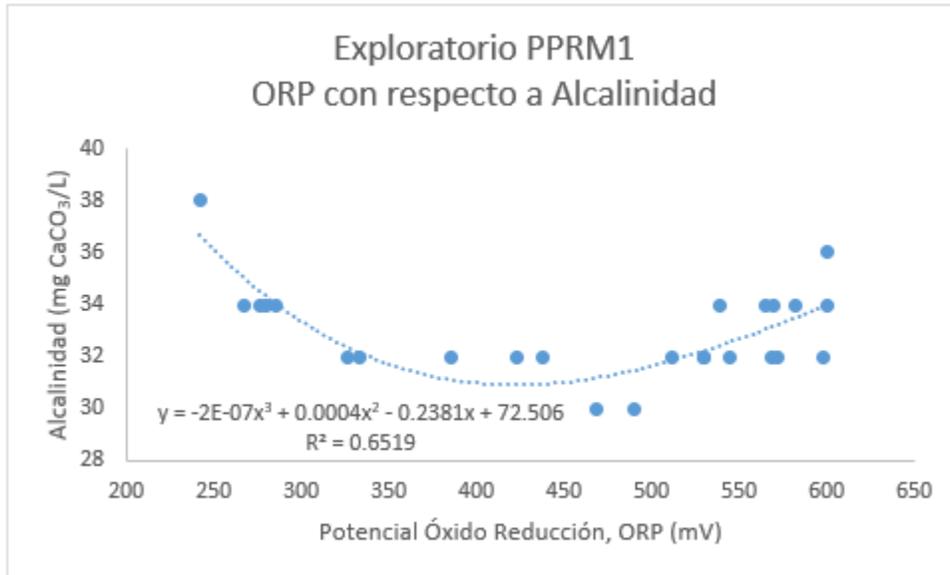
A1. 2. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a pH



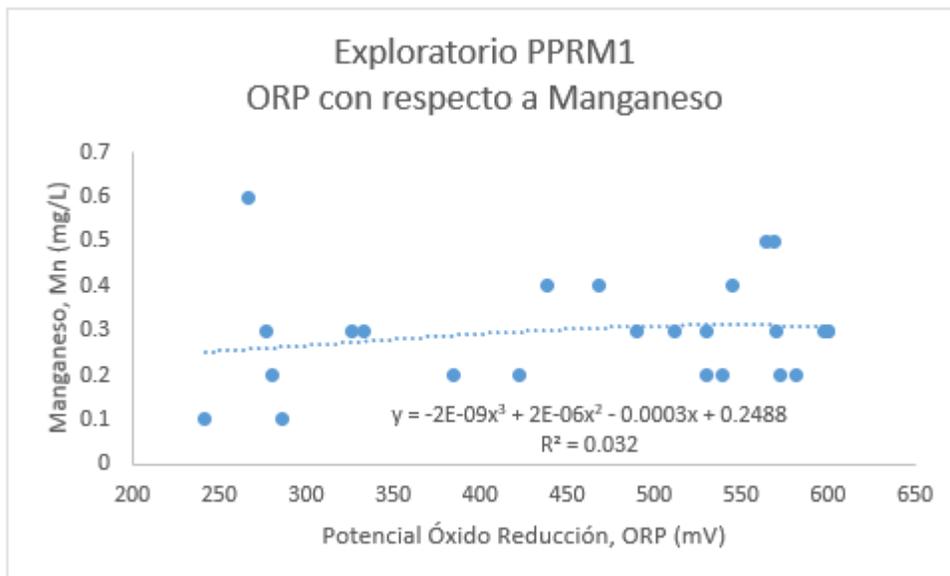
A1. 3. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Absorbancia UV_{254nm}



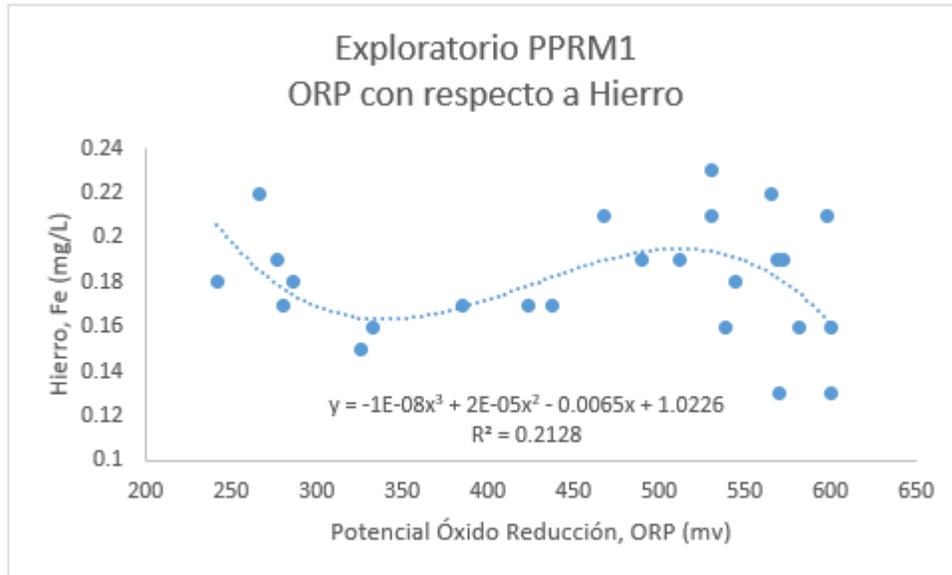
A1. 4. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Nitratos



A1. 5. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Alcalinidad

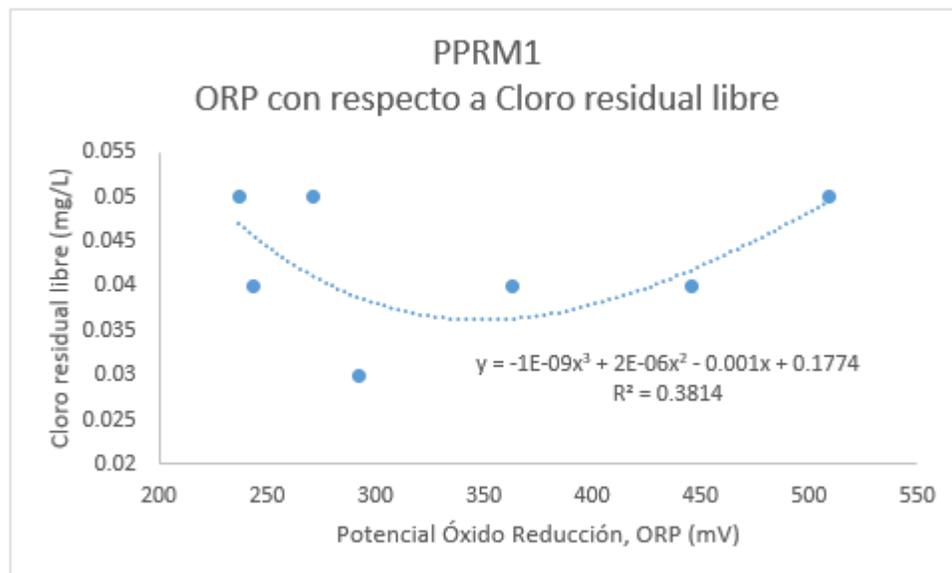


A1. 6. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Manganeso

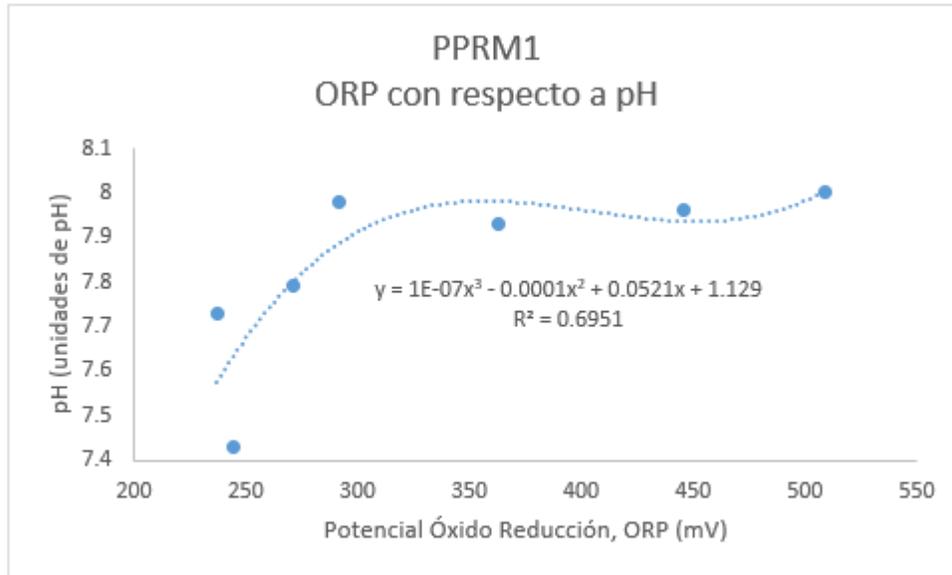


A1. 7. Exploratorio PPRM1, ORP con respecto a Hierro

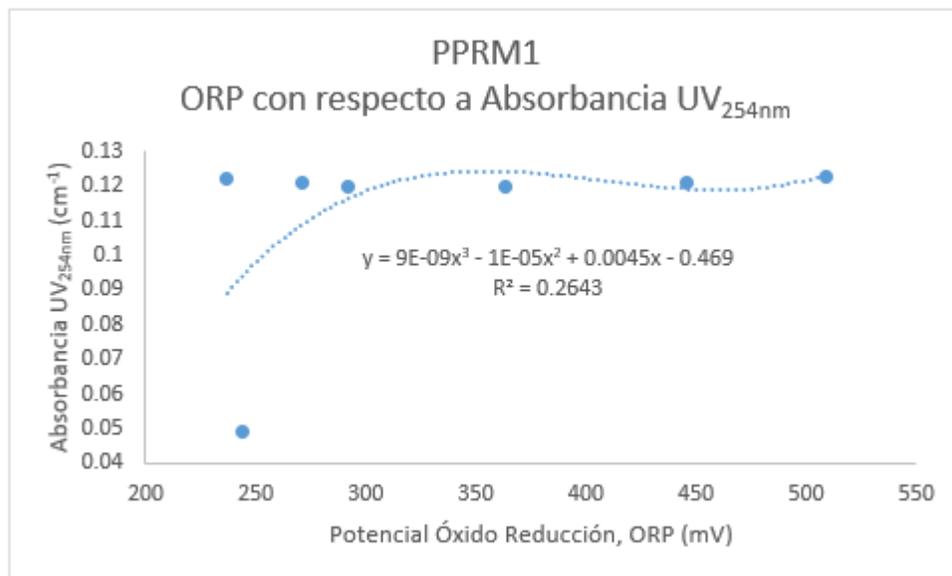
A1.2 Análisis en Planta Potabilizadora Río Magdalena1



A1. 8. PPRM1, ORP con respecto a Cloro residual libre

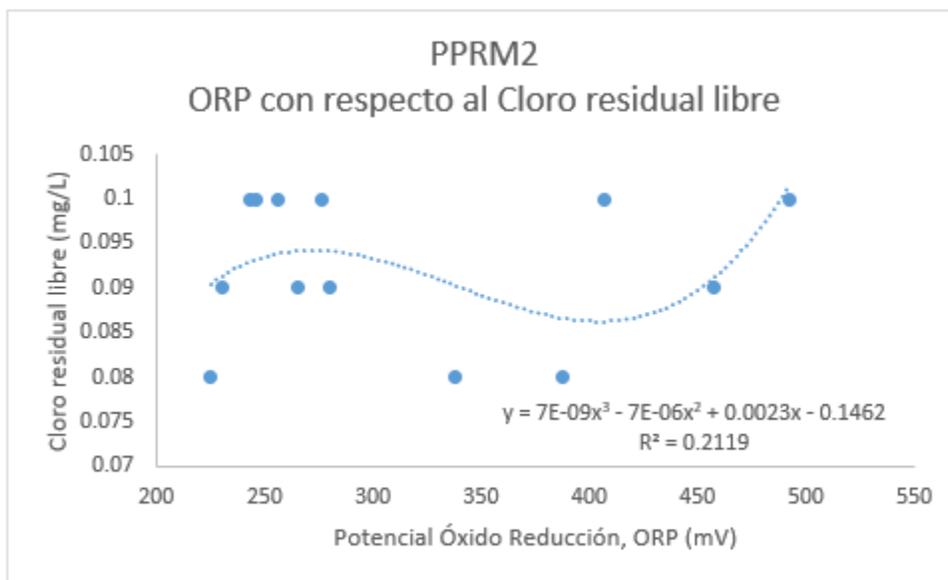


A1. 9. PPRM1, ORP con respecto a pH

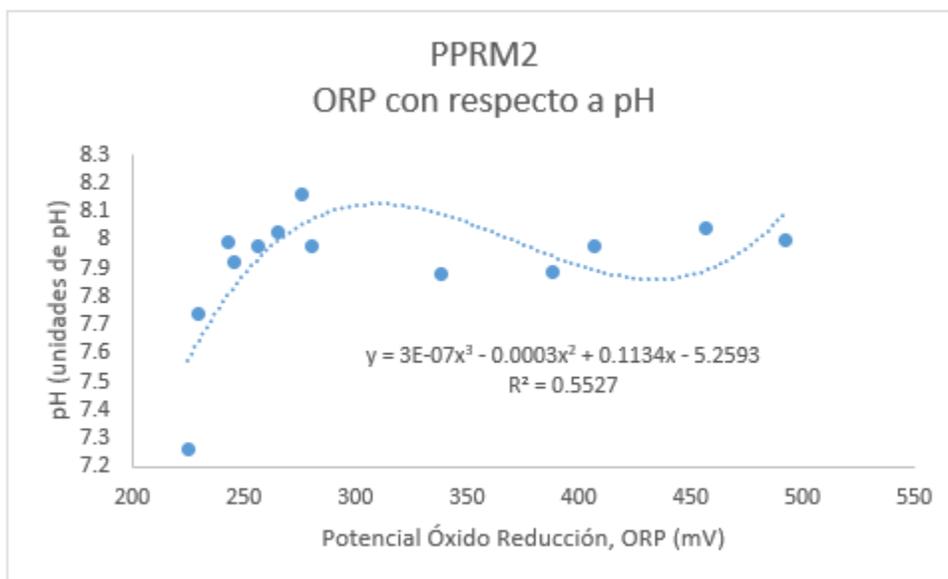


A1. 10. PPRM1, ORP con respecto a Absorbancia UV_{254nm}

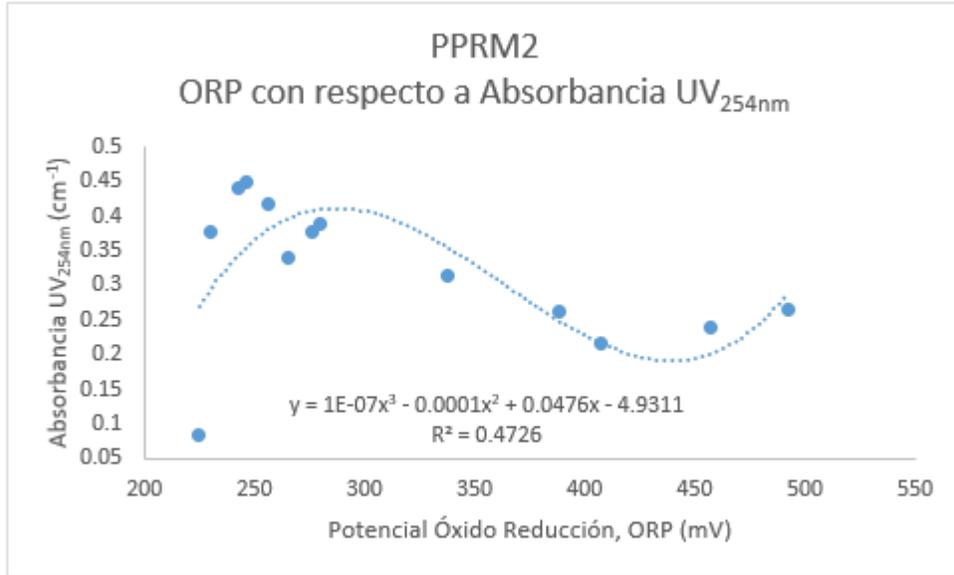
A1.3 Análisis en Planta Potabilizadora Río Magdalena 2



A1. 11. PPRM2, ORP con respecto al Cloro residual libre



A1. 12. PPRM2, ORP con respecto a pH



A1. 13. PPRM2, ORP con respecto a Absorbancia UV_{254nm}

A2. Detalle del ANOVA realizado

A2.1 Calidad inicial entre PP1 y PP2, para poder emplear un estándar de referencia

RESUMEN	PP1	PP2	Total
<i>pH (U pH)</i>			
Cuenta	3	3	6
Suma	22.13	22.43	44.56
Promedio	7.37666667	7.47666667	7.42666667
Varianza	0.06603333	0.12703333	0.08022667
<i>Conductividad (mS/cm)</i>			
Cuenta	3	3	6
Suma	2451.5	2386	4837.5
Promedio	817.166667	795.333333	806.25
Varianza	277.743333	188.743333	329.603
<i>Temperatura (°C)</i>			
Cuenta	3	3	6
Suma	43.9	44.6	88.5
Promedio	14.6333333	14.8666667	14.75
Varianza	10.4433333	2.82333333	5.323
<i>Oxígeno disuelto (mg/L)</i>			
Cuenta	3	3	6
Suma	22.58	22.69	45.27
Promedio	7.52666667	7.56333333	7.545
Varianza	0.11323333	0.07703333	0.07651
<i>Potencial Redox (mV)</i>			
Cuenta	3	3	6
Suma	883	1270	2153
Promedio	294.333333	423.333333	358.833333
Varianza	2054.33333	1812.33333	6538.96667
<i>Color verdadero (Pt-Co)</i>			
Cuenta	3	3	6
Suma	0	0	0
Promedio	0	0	0

Varianza	0	0	0
----------	---	---	---

Color aparente (Pt-Co)

Cuenta	3	3	6
Suma	24	37	61
Promedio	8	12.33333333	10.16666667
Varianza	0	4.333333333	7.366666667

Cloro total (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0.26	0.25	0.51
Promedio	0.086666667	0.083333333	0.085
Varianza	0.004133333	0.000133333	0.00171

Cloro residual libre (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0.17	0.21	0.38
Promedio	0.056666667	0.07	0.063333333
Varianza	0.000433333	1E-04	0.000266667

Turbiedad (NTU)

Cuenta	3	3	6
Suma	20.75	26.87	47.62
Promedio	6.916666667	8.956666667	7.936666667
Varianza	0.536433333	0.704533333	1.744866667

Abs UV254 (Abs)

Cuenta	3	3	6
Suma	0.135	0.167	0.302
Promedio	0.045	0.055666667	0.050333333
Varianza	7E-06	4.3333E-06	3.8667E-05

Nitratos (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	8.2	8.4	16.6
Promedio	2.733333333	2.8	2.766666667
Varianza	0.243333333	1.12	0.546666667

Nitritos (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0.012	0.017	0.029
Promedio	0.004	0.005666667	0.004833333

Varianza	0.000003	3.3333E-07	2.1667E-06
----------	----------	------------	------------

Ortofosfatos (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0.5	0.54	1.04
Promedio	0.16666667	0.18	0.17333333
Varianza	0.00603333	0.0013	0.00298667

Hierro (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0.57	0.63	1.2
Promedio	0.19	0.21	0.2
Varianza	0.0001	1E-04	0.0002

Manganeso (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0.8	1	1.8
Promedio	0.26666667	0.33333333	0.3
Varianza	0.00333333	0.01333333	0.008

Alcalinidad (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	112	106	218
Promedio	37.33333333	35.33333333	36.33333333
Varianza	1.33333333	1.33333333	2.26666667

Dureza total (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0	6	6
Promedio	0	2	1
Varianza	0	12	6

Dureza de Calcio (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	0	4	4
Promedio	0	1.33333333	0.66666667
Varianza	0	5.33333333	2.66666667

ST (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	324	308	632
Promedio	108	102.666667	105.333333

Varianza	48	105.333333	69.8666667
----------	----	------------	------------

SDT (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	236	162	398
Promedio	78.6666667	54	66.3333333
Varianza	21.3333333	228	282.266667

SST (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	88	146	234
Promedio	29.3333333	48.6666667	39
Varianza	37.3333333	641.333333	383.6

COT (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	13.2	13.4	26.6
Promedio	4.4	4.46666667	4.43333333
Varianza	10.08	6.04333333	6.45066667

DQOt (mg/L)

Cuenta	3	3	6
Suma	11.3	19.8	31.1
Promedio	3.76666667	6.6	5.18333333
Varianza	2.08333333	1.75	3.94166667

Coliformes totales (UFC/100 mL)

Cuenta	3	3	6
Suma	2214	2100	4314
Promedio	738	700	719
Varianza	0	4332	2166

E. Coli (UFC/100 mL)

Cuenta	3	3	6
Suma	758	18	776
Promedio	252.666667	6	129.333333
Varianza	176661.333	4	88919.4667

Total

Cuenta	78	78	
Suma	7235.007	6704.004	

Promedio	92.7565	85.9487692
Varianza	49838.2393	44117.5577

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	6742772.6	25	269710.904	75.2120287	2.0096E-55	1.61210344
Columnas	1807.46273	1	1807.46273	0.50403205	0.47932265	3.93243783
Interacción	118878.983	25	4755.15932	1.32603159	0.16321987	1.61210344
Dentro del grupo	372944.787	104	3586.00756			
Total	7236403.83	155				

A2.2 Evaluación del funcionamiento de los sistemas de desinfección en cada PP

RESUMEN PPI	AC	ITF	ID	ED	Total
<i>pH (U pH)</i>					
Cuenta		3	3	3	12
Suma		22.13	23.31	23.42	92.29
Promedio	7.37666667	7.77	7.80666667	7.81	7.69083333
Varianza	0.06603333	0.1147	0.04203333	0.0037	0.07733561
<i>ORP (mV)</i>					
Cuenta		3	3	3	12
Suma		883	1911	1988	6780
Promedio	294.333333	637	662.666667	666	565
Varianza	2054.33333	364	96.3333333	61	27245.8182
<i>Cloro residual (mg/L)</i>					
Cuenta		3	3	3	12
Suma		0.17	5.56	5.05	15.81
Promedio	0.05666667	1.85333333	1.68333333	1.67666667	1.3175

Varianza 0.00043333 0.08123333 0.06303333 0.05373333 0.61962045

Cloro total (mg/L)

Cuenta	3	3	3	3	12
Suma	0.26	5.91	5.39	5.2	16.76
Promedio	0.08666667	1.97	1.79666667	1.73333333	1.39666667
Varianza	0.00413333	0.0711	0.05823333	0.03743333	0.66329697

Coliformes totales (UFC/100 mL)

Cuenta	3	3	3	3	12
Suma	2214	2	0	4	2220
Promedio	738	0.66666667	0	1.33333333	185
Varianza	0	1.33333333	0	5.33333333	111204.727

E. coli (UFC/100 mL)

Cuenta	3	3	3	3	12
Suma	758	0	0	0	758
Promedio	252.666667	0	0	0	63.1666667
Varianza	176661.333	0	0	0	45178.5152

Total

Cuenta	18	18	18	18	
Suma	3877.56	1947.78	2021.86	2035.66	
Promedio	215.42	108.21	112.325556	113.092222	
Varianza	94567.0849	59263.1368	64156.988	64752.3125	

ANÁLISIS DE VARIANZA PP1

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	2933493.78	5	586698.756	78.5563228	6.2546E-22	2.40851412
Columnas	146856.53	3	48952.1765	6.55447611	0.00083572	2.79806064
Interacción Dentro del grupo	1514589.57	15	100972.638	13.5197818	1.9786E-12	1.88017458
	358488.525	48	7468.51094			
Total	4953428.41	71				

RESUMEN PP2	CR	EFD	ED	Total
<i>pH (U pH)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	22.43	22.94	22.8	68.17
Promedio	7.47666667	7.64666667	7.6	7.57444444
Varianza	0.12703333	0.01163333	0.0003	0.04052778
<i>ORP (mV)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	1270	1307	1661	4238
Promedio	423.333333	435.666667	553.666667	470.888889
Varianza	1812.33333	842.333333	12830.3333	7754.11111
<i>Cloro residual (mg/L)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	0.21	0.2	1.52	1.93
Promedio	0.07	0.06666667	0.50666667	0.21444444
Varianza	1E-04	0.00043333	0.00013333	0.04820278
<i>Cloro total (mg/L)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	0.25	0.21	1.55	2.01
Promedio	0.08333333	0.07	0.51666667	0.22333333
Varianza	0.00013333	0.0003	0.00013333	0.048575
<i>Coliformes totales (UFC/100 mL)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	2100	1516	40	3656
Promedio	700	505.333333	13.3333333	406.222222
Varianza	4332	162401.333	533.333333	135750.444
<i>E. coli (UFC/100 mL)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	18	16	0	34
Promedio	6	5.33333333	0	3.77777778
Varianza	4	21.3333333	0	14.4444444
<i>Total</i>				
Cuenta	18	18	18	

Suma	3410.89	2862.35	1726.87
Promedio	189.493889	159.019444	95.9372222
Varianza	80815.4812	71007.2447	45964.9848

ANÁLISIS DE VARIANZA PP2

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	2296203.43	5	459240.687	45.2262923	1.5568E-14	2.47716867
Columnas	81965.4504	2	40982.7252	4.03600282	0.02621286	3.25944631
Interacción Dentro del grupo	700633.368	10	70063.3368	6.89987851	6.5426E-06	2.10605391
	365554.28	36	10154.2856			
Total	3444356.53	53				

A2.3 Evaluación de los resultados obtenidos en las desinfecciones simuladas de cada PP

RESUMEN PPI

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	6	1019.41	169.901667	86386.8257
Columna 2	6	547.03	91.1716667	48142.0191

ANÁLISIS DE VARIANZA PP2

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	18595.2387	1	18595.2387	0.27644984	0.61049813	4.96460274
Dentro de los grupos	672644.224	10	67264.4224			

RESUMEN PP2

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	6	978.43	163.071667	87166.3023
Columna 2	6	531.13	88.5216667	45315.0785

ANÁLISIS DE VARIANZA PP2

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	16673.1075	1	16673.1075	0.25170492	0.6267378	4.96460274
Dentro de los grupos	662406.904	10	66240.6904			
Total	679080.011	11				

A3. Detalle de los resultados obtenidos en el análisis de Superficie de Respuesta

A3.1 Superficie de Respuesta en PPI

Estadísticas de la regresión: Coliformes totales

Coefficiente de correlación múltiple	0.9583893
Coefficiente de determinación R ²	0.91851005
R ² ajustado	0.87776507
Error típico	42.058806
Observaciones	7

ANÁLISIS DE VARIANZA: Coliformes totales

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	79754.227	39877.1137	22.5429028	0.00664061
Residuos	4	7075.7726	1768.94316		
Total	6	86830			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción Y	410.112332	99.52342	4.12076203	0.01460337	133.791018	686.433645	133.791018	686.4336446
Variable X 1	-0.3370465	0.0506925	-6.6488458	0.00265677	-0.4777914	-0.1963016	-0.4777914	-0.196301624
Variable X 2	1738.4423	2344.7363	0.74142339	0.49960509	-4771.5892	8248.47382	-4771.5892	8248.473818

Estadísticas de la regresión: E. coli

Coefficiente de correlación múltiple	0.88594968
Coefficiente de determinación R ²	0.78490683
R ² ajustado	0.67736025
Error típico	68.3310684
Observaciones	7

ANÁLISIS DE VARIANZA: E. coli

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	68153.46	34076.7302	7.29829634	0.04626507
Residuos	4	18676.54	4669.13491		
Total	6	86830			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción Y	511.229342	160.28741	3.18945421	0.03323354	66.2001577	956.258527	66.2001577	956.258527
Variable X 1	-8.6528949	2.2911063	-3.7767322	0.01949073	-15.014026	-2.2917641	-15.014026	-2.291764079
Variable X 2	-1047.5548	3701.3955	-0.2830162	0.791207	-11324.276	9229.16652	-11324.276	9229.166518

A3.2 Superficie de Respuesta en PP2

Estadísticas de la regresión: Coliformes totales

Coefficiente de correlación múltiple	0.95959645
Coefficiente de determinación R ²	0.92082535
R ² ajustado	0.90499042
Error típico	34.1427858
Observaciones	13

ANÁLISIS DE VARIANZA: Coliformes totales

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	135577.93	67788.9663	58.1515244	3.1112E-06
Residuos	10	11657.298	1165.72982		
Total	12	147235.23			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción Y	385.469599	109.8727	3.50832902	0.00564739	140.657957	630.281241	140.657957	630.281241
Variable X 1	-0.3332614	0.0309633	-10.763124	8.0691E-07	-0.4022518	-0.2642709	-0.4022518	-0.26427093
Variable X 2	1045.00922	1184.78	0.88202806	0.39846709	-1594.8452	3684.86361	-1594.8452	3684.863608

Estadísticas de la regresión: E. coli

Coefficiente de correlación múltiple	0.87132342
Coefficiente de determinación R ²	0.7592045
R ² ajustado	0.7110454
Error típico	59.5429094
Observaciones	13

ANÁLISIS DE VARIANZA: E. coli

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	111781.65	55890.8251	15.7645079	0.00080955
Residuos	10	35453.581	3545.35806		
Total	12	147235.23			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción Y	472.791889	193.0832	2.44864327	0.03433741	42.5757001	903.008078	42.5757001	903.0080779
Variable X 1	-20.017609	3.5735276	-5.6016383	0.00022717	-27.979925	-12.055294	-27.979925	-12.05529364
Variable X 2	60.4589114	2070.043	0.0292066	0.97727449	-4551.8843	4672.80208	-4551.8843	4672.802084