



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA CALIDAD DEL
AGUA RESIDUAL Y SU EFECTO EN CUATRO
DIFERENTES PROCESOS DE TRATAMIENTO EN
LA CIUDAD DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICA

PRESENTA:

ALONDRA IBÁÑEZ DÁVILA



CIUDAD DE MÉXICO

AÑO 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: M. C. GRACIA MORA MARÍA ISABEL

SECRETARIO: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

VOCAL: QA. HERNÁNDEZ CHACÓN JUAN CARLOS

1ER. SUPLENTE: QFB. GONZÁLEZ OLGUÍN FABIOLA

2DO. SUPLENTE: QFB. GARCÍA RAMÍREZ GLORIA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM. EDIFICIO 5. SUBDIRECCIÓN DE HIDRÁULICA Y AMBIENTAL.

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PROCESOS ANAEROBIOS (GIPA).

CIRCUITO ESCOLAR S/N, CIUDAD UNIVERSITARIA, DELEGACIÓN COYOACÁN, CIUDAD DE MÉXICO.

ASESOR:

DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

SUPERVISORES TÉCNICOS:

MTRA. MARGARITA ELIZABETH CISNEROS ORTIZ

DR. JUAN MANUEL MORGAN SAGASTUME

SUSTENTANTE:

ALONDRA IBÁÑEZ DÁVILA



El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015 No. de Certificado CMX C SGC 209 2020, válido en el período del 12 de noviembre de 2020 al 11 de noviembre de 2023.



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

**SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA,
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN**

Este trabajo fue desarrollado gracias al apoyo de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) del Gobierno de la Ciudad de México (proyecto 265/2019).

“La idea de la muerte individual deja de tener importancia, si uno adquiere la certeza de sobrevivir en los demás, sobrevivir en las cosas que quedan”

Eduardo Galeano

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad, la Facultad de Química y el Instituto de Ingeniería por la formación, los recursos y la estancia para poder concluir esta etapa.

Agradezco al apoyo de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) por la beca otorgada durante la realización de este proyecto.

Al Dr. Adalberto Noyola, por su confianza y por ser mi asesor de tesis, el aprendizaje que he obtenido de usted ha sido invaluable.

A la Mtra. Margarita Cisneros, por su enseñanza dentro y fuera del laboratorio, gracias por su apoyo y por fortalecer cada día mi aprendizaje dentro del grupo.

Al Dr. Juan Manuel Morgan y el Dr. Daniel de los Cobos, por el apoyo y seguimiento para realizar este trabajo.

Al Ing. Roberto Briones, la Mtra. Diana García y la QFB. Denise Reyes, por su apoyo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental, por facilitarme los accesos y las capacitaciones para poder realizar todos los experimentos involucrados en este proyecto.

Al Grupo de Investigación en Procesos Anaerobios (GIPA), en especial a mis compañeros de proyecto: Michel Cruz, Bianca Valencia, Raúl Robles, Natalia Villamizar, Yovanny Cuetero y Álvaro Yrizar. Gracias por el apoyo para realizar todos los experimentos y por todas esas aventuras que pasamos durante el proyecto. A Dianys Linares y Mell Portilla, gracias a ustedes y a todos por su compañía e invaluable amistad.

A mis amigos de la Facultad de Química, Vanessa Ángeles, Marco Morales, Aquiles Gutiérrez y Karen Pérez. Que buenos momentos pasamos en la Universidad.

A Oscar Guadarrama, por todos los días que hemos compartido en las diferentes etapas que hemos estado juntos. Ha sido agradable tu compañía durante todo este tiempo.

A Carlos González, Ian Gabriel González y Alejandro Cruz, por las risas y su agradable compañía durante los días y las noches de desvelo.

A mis hermanos, Iván Ibáñez y Stephanie Ibáñez, por su cariño y paciencia en mis días buenos y malos durante esta etapa. Gracias por escucharme, y estar ahí siempre.

A mi mamá, Reyna Dávila por su cariño, comprensión, enseñanzas y apoyo a lo largo de este camino. Sin ti y mis hermanos no lo hubiera logrado.

Finalmente, a mis tíos Luis Dávila y Liliana Dávila, por sus enseñanzas, el cariño, las risas y todos los buenos momentos que compartimos. Siempre estarán presentes.

RESUMEN

Los análisis de calidad del agua se realizan, entre varios motivos, para evaluar la presencia y concentración de contaminantes en descargas de agua residual y agua residual tratada en plantas de tratamiento. El reúso del agua tratada es una estrategia adecuada para sustituir agua de primer uso en actividades agrícolas, pecuarias, industriales, municipales e incluso a nivel doméstico, sin dejar de lado el uso ecológico. El agua tratada debe cumplir con la normativa ambiental que le corresponda, que determina límites en varios parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

El presente trabajo se inscribe dentro del proyecto “Análisis de la eficacia en la remoción de patógenos en efluentes y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales en la Ciudad de México con fines de reúso seguro”, financiado por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) del Gobierno de la Ciudad de México (proyecto 265/2019).

El objetivo de esta tesis fue evaluar la influencia de la variación estacional en las características del influente y del efluente, en temporada de lluvias y estiaje, para cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la Ciudad de México. Se caracterizaron contaminantes convencionales de aguas residuales municipales y se seleccionaron cuatro PTAR que representan cinco tecnologías de tratamiento.

Los parámetros de calidad del agua que se determinaron en influentes y efluentes de cada planta, fueron los siguientes: pH, alcalinidad, conductividad, temperatura, demanda química de oxígeno total y soluble (DQO), carbono orgánico total (COT en forma total y soluble), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-), fósforo total (PT), ortofosfatos (PO_4^{3-}), sólidos totales, suspendidos y disueltos en sus tres formas (totales, volátiles y fijos), surfactantes aniónicos, así como coliformes fecales, totales y huevos de helminto.

Estos parámetros evaluados en temporada de lluvias y estiaje en los influentes de las cuatro PTAR permitieron identificar en algunos de ellos una mayor concentración promedio en estiaje. Por ejemplo, la DQO total en temporada de estiaje tuvo una concentración de 374.08 ± 88.72 mg/L, en comparación con el valor en lluvias (237.88 ± 91.16 mg/L). Los resultados promedio de la mayoría de los parámetros medidos mostraron la misma tendencia, corroborando que la estacionalidad si influye en la carga contaminante del agua residual, consecuencia de contar en la ciudad con un drenaje combinado en temporada de lluvias. Cuando se analiza estadísticamente los datos mediante pruebas de ANOVA y t de Student, la diferencia es estadísticamente significativa en ambas temporadas para los parámetros pH, DQO total y soluble, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos totales y volátiles. Sin embargo, entre cada PTAR en particular, el análisis de Tukey-Kramer indica que la ocurrencia de diferencias significativas entre sus parámetros de calidad influente se reduce en la temporada de estiaje, si se compara con la que se presenta en lluvias. En esta última

temporada, solo se presentaron diferencias estadísticamente significativas en pH, temperatura y NTK para alguna de las PTAR.

Al comparar los datos de este trabajo con los obtenidos durante 10 años por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), se encuentra que los datos históricos muestran en general mayores valores promedio en varios parámetros del influente, pero con una alta desviación estándar. Tal dispersión de datos impide identificar diferencias significativas, aún en el caso de algunos parámetros que muestran valores promedio puntuales claramente diferentes.

Al evaluar los datos obtenidos para agua efluente de cada una de las PTAR estudiadas, se concluye que cumplen con la NOM- 003- SEMARNAT- 1997. Aunque los influentes, contienen mayor concentración de materia orgánica e inorgánica durante la época de estiaje, las plantas de tratamiento estudiadas no se vieron afectadas en el proceso de tratamiento, ya la calidad del efluente al final de cada PTAR, no se vio afectada por la estacionalidad.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO 2. POBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES	18
2.1. ESTRÉS HÍDRICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO	20
2.2. AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.....	22
2.2.1. Variación estacional y tipo de drenaje de agua residual en la Ciudad de México....	22
2.2.2. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales	27
2.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES	34
2.3.1. Tratamiento preliminar	34
2.3.2. Tratamiento primario.....	35
2.3.3. Tratamiento secundario.....	35
2.3.4. Tratamiento terciario o avanzado	38
2.3.5. Desinfección	39
2.3.6. Remoción de contaminantes.....	40
2.3.7. Importancia del control y operación de las plantas de tratamiento	42
2.4. REÚSO DE AGUA TRATADA.....	43
2.5. NORMATIVIDAD VIGENTE.....	44
2.6. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y REÚSO DEL AGUA TRATADA.....	45
CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	50
3.1. JUSTIFICACIÓN	50
3.2. HIPÓTESIS.....	50
3.3. OBJETIVOS.....	51
3.3.1. Objetivo general.....	51
3.3.2. Objetivos específicos.....	51
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	52
4.1. ANÁLISIS EXPERIMENTAL	52
4.1.1. Muestreo de las PTAR	53
4.1.2. Caracterización fisicoquímica del agua residual.....	62
4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO ESTUDIADAS	66

4.2.1. PTAR Cerro de la Estrella.....	66
4.2.2. PTAR Chapultepec.....	68
4.2.3. PTAR Santa Fe.....	70
4.2.4. PTAR Ecoducto	71
4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE BITÁCORAS DE SACMEX (DATOS HISTÓRICOS)	73
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	81
5.1. INFLUENCIA DE LLUVIA Y ESTIAJE EN LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DE LA CD. DE MÉXICO.....	82
5.2. COMPARACIÓN DE LOS VALORES HISTÓRICOS DEL AGUA RESIDUAL DE LA CD. DE MÉXICO CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS	91
5.3. INFLUENCIA DE LLUVIA Y ESTIAJE EN LA CALIDAD DEL AGUA INFLUENTE PARA CADA PTAR EVALUDA Y SU DESEMPEÑO.....	98
5.3.1. Análisis estadístico	98
5.3.2. PTAR Cerro de la Estrella.....	104
5.3.3. PTAR Chapultepec.....	110
5.3.4. PTAR Santa Fe.....	116
5.3.5. PTAR Ecoducto	122
5.4. COMPARACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO	131
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	136
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	137
ANEXOS	139

ABREVIATURAS

Alc: Alcalinidad Total
DQO: Demanda Química de Oxígeno
COT: Carbono Orgánico Total
NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl
PT: Fosforo Total
ST: Sólidos Totales
STV: Sólidos Totales Volátiles
STF: Sólidos Totales Fijos
SST: Sólidos Suspendidos Totales
SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles
SSF: Sólidos Suspendidos Fijos
SDV: Sólidos Disueltos Totales
SDV: Sólidos Disueltos Volátiles
SDF: Sólidos Disueltos Fijos
CE: Contaminantes emergentes
SACMEX: Sistema de Aguas de la Ciudad de México
PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
LIA: Laboratorio de Ingeniería Ambiental

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2.

Figura 2.1. Descarga de aguas residuales municipales en México (CONAGUA, 2020).	19
Figura 2.2. Causas y efectos de estrés hídrico en la Ciudad de México (Fundación UNAM, 2021).	21
Figura 2.3. Ejemplo de un sistema de drenaje (CONAGUA, 2019).	23
Figura 2.4. Sistema de drenaje de la Ciudad de México (SACMEX, 2021).	25
Figura 2.5. Comparativa del desalojo de agua residual en la CDMX 1910 – 2002 (SACMEX, 2016).	26
Figura 2.6. Reacción de complejación del sulfonato de alquilbenceno lineal con azul de metileno.	31

CAPÍTULO 4.

Figura 4.1. Esquema general del tren tratamiento de la PTAR Cerro de la estrella.	53
Figura 4.2. Esquema general del tren tratamiento de la PTAR Chapultepec.	54
Figura 4.3. Esquema general del tren tratamiento de la PTAR Santa Fe.	55
Figura 4.4. Esquema general del tren de tratamiento de la PTAR Ecoducto.	56
Figura 4.5. Toma de muestra. a) Agua influente PTAR Santa Fe. b) Agua efluente PTAR Cerro de la estrella.	57
Figura 4.6. Toma de muestra. a) Agua efluente PTAR Chapultepec. b) Vaciado de muestra simple.	57
Figura 4.7. Toma de muestra PTAR Ecoducto. a) Agua influente (desarenador). b) Toma de muestra agua efluente PTAR (humedales).	58
Figura 4.8. Medida de parámetros fisicoquímicos en el sitio, conductividad, temperatura y pH.	58
Figura 4.9. Preparación de la muestra compuesta de los tres puntos de muestreo.	59
Figura 4.10. a) Toma de muestra simple de 300 mL PTAR Ecoducto. b) Tiosulfato de sodio agregado a las muestras simples de Cerro de la Estrella y Santa Fe.	60
Figura 4.11. Muestras conservadas en frío. a) Muestras simples de 300 mL. b) Muestras simples de 3 L.	60
Figura 4.12. Llegada de muestras al LIA, Instituto de Ingeniería, UNAM.	61
Figura 4.13. a) Almacenamiento de muestras a -4 °C. b) Preparación de muestra compuesta; área microbiológica.	62
Figura 4.14. Esquema del procedimiento analítico para la determinación de surfactantes aniónicos (Jurado et al., 2006).	64
Figura 4.15. Soluciones estándares (2.5– 0 mg/L) para la determinación de la curva de calibración para surfactantes aniónicos.	65

Figura 4.16. Curva de calibración para el surfactante aniónico LAS, mediante el método simplificado de sustancias activas al azul de metileno.	66
Figura 4.17. Vista de la PTAR Cerro de la Estrella (sedimentadores secundarios).	67
Figura 4.18. Vista de la PTAR Chapultepec.	68
Figura 4.19. Vista de la PTAR Santa Fe.	70
Figura 4.20. Vista de la PTAR Ecoducto (tanques desarenadores en primer plano).	72

CAPÍTULO 5.

Figura 5.1. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de lluvias de la CDMX.	85
Figura 5.2. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de lluvias de la CDMX.	85
Figura 5.3. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua residual producida en la CDMX, conjuntando época de lluvias y estiaje.	91
Figura 5.4. Datos históricos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de lluvias de la CDMX.	93
Figura 5.5. Datos históricos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de estiaje de la CDMX.	93
Figura 5.6. Datos históricos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua residual producida en la CDMX.	94
Figura 5.7. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México, en la temporada de lluvias obtenida por SACMEX y en el LIA-UNAM. Datos por pares para cada parámetro.	96
Figura 5.8. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México, en la temporada de estiaje obtenida por SACMEX y en el LIA-UNAM. Datos por pares para cada parámetro.	96
Figura 5.9. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México obtenida en este trabajo, durante la temporada de lluvias y estiaje. Datos por pares para cada parámetro.	97
Figura 5.10. Comparación de la caracterización con datos históricos (SACMEX) del agua residual de la Cd. de México, durante la temporada de lluvias y estiaje. Datos por pares para cada parámetro.	98
Figura 5.11. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua influente de la PTAR Cerro de la Estrella para ambas temporadas (lluvias y estiaje).	106
Figura 5.12. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Cerro de la Estrella para ambas temporadas (lluvias y estiaje).	106
Figura 5.13. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua influente de la PTAR Chapultepec para ambas temporadas (lluvia y estiaje).	112

Figura 5.14. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Chapultepec para ambas temporadas (lluvia y estiaje).....	112
Figura 5.15. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua influente de la PTAR Santa Fe para ambas temporadas (lluvia y estiaje).	118
Figura 5.16. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Santa Fe para ambas temporadas (lluvia y estiaje).	118
Figura 5.17. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvia y estiaje).	124
Figura 5.18. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvia y estiaje).	124
Figura 5.19. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua efluente de biodigestores de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvia y estiaje).	125
Figura 5.20. Eficiencias de remoción de las PTAR estudiadas en el LIA-UNAM, en temporada de lluvias y estiaje.	134
Figura 5.21. Eficiencias de remoción (promedio general) de las PTAR estudiadas en el LIA-UNAM y SACMEX.	135

ANEXOS.

Figura A.1. Datos promedio y su respectiva desviación estándar del agua residual de la Cd. de México. en temporada de lluvias y estiaje.	142
Figura A.2. Datos promedio y su respectiva desviación estándar del agua residual producida en la Cd. de México.....	142

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1. Características de la red secundaria y primaria de la CDMX.	23
Tabla 2.2. Remoción de sólidos suspendidos, sedimentables y flotantes.....	41
Tabla 2.3. Remoción de materia orgánica biodegradable.	41
Tabla 2.4. Remoción de nutrientes.	42
Tabla 2.5. Remoción de patógenos.	42
Tabla 2.6. Reúso del agua tratada en las diferentes alcaldías de la Ciudad de México (SACMEX, 2020).	46

CAPÍTULO 4.

Tabla 4.1. Tecnologías empeladas de las PTAR seleccionadas en este estudio.	52
Tabla 4.2. Calendario de las dos temporadas de muestreo.	62
Tabla 4.3. Parámetros fisicoquímicos y equipos empleados para el análisis.	63
Tabla 4.4. Datos de la curva de calibración realizada para la determinación de surfactantes aniónicos.	65
Tabla 4.5. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	74
Tabla 4.6. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	74
Tabla 4.7. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	75
Tabla 4.8. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	75
Tabla 4.9. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	76
Tabla 4.10. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	76
Tabla 4.11. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	77
Tabla 4.12. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	77
Tabla 4.13. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	78
Tabla 4.14. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	78

Tabla 4.15. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	79
Tabla 4.16. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.	79
Tabla 4.17. Datos obtenidos por SACMEX de muestras simples (un solo muestreo).	80

CAPÍTULO 5.

Tabla 5.1. Valores promedio de agua influente en temporada de lluvias de cuatro PTAR estudiadas, en la Cd. de México y su respectivo promedio general.....	83
Tabla 5.2. Valores promedio de agua influente en temporada de estiaje de cuatro PTAR estudiadas, en la Cd. de México y su respectivo promedio general.....	84
Tabla 5.3. Comparación del agua influente en temporada de lluvias y estiaje con los datos de las cuatro PTAR evaluadas, mediante el análisis estadístico T de student.	86
Tabla 5.4. Caracterización representativa del agua residual de la Cd. de México, datos promedio generales de la temporada de lluvias y estiaje, con un número de datos igual a (n = 24).	90
Tabla 5.5. Valores históricos promedio obtenidos por SACMEX, de agua influente en temporada de lluvias de tres PTAR estudiadas y su respectivo promedio general.....	92
Tabla 5.6. Valores históricos promedio obtenidos por SACMEX, de agua influente en temporada de estiaje de tres PTAR estudiadas y su respectivo promedio general.	92
Tabla 5.7. Caracterización del agua residual de la Cd. de México, datos históricos promedio de ambas temporadas y su promedio general.....	94
Tabla 5.8. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México, obtenida por SACMEX (datos históricos) y por LIA-UNAM (este trabajo).....	95
Tabla 5.9. Comparación del agua influente en temporada de lluvias de cada PTAR estudiada mediante el análisis estadístico Tukey-Kramer.	99
Tabla 5.10. Comparación del agua influente en temporada de estiaje de cada PTAR estudiada mediante el análisis estadístico Tukey-Kramer.	102
Tabla 5.11. Caracterización de agua influente y efluente para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Cerro de la Estrella y eficiencias de remoción.	105
Tabla 5.12. Comparación del agua influente y efluente de la PTAR Cerro de la Estrella para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico T de student.	107
Tabla 5.13. Caracterización de agua influente y efluente para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Chapultepec y eficiencias de remoción.	111
Tabla 5.14. Comparación del agua influente y efluente de la PTAR Chapultepec para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico T de student.	113
Tabla 5.15. Caracterización de agua influente y efluente para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Santa Fe y eficiencias de remoción	117

Tabla 5.16. Comparación del agua influente y efluente de la PTAR Santa Fe para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico T de student.....	119
Tabla 5.17. Caracterización de agua influente, efluente anaerobio y efluente final para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Ecoducto y eficiencias de remoción.....	123
Tabla 5.18. Comparación del agua influente y efluente de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico T de student.....	125
Tabla 5.19. Características del agua efluente de biodigestores de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico T de student.....	128
Tabla 5.20. Comparación de la remoción de contaminantes, obtenida por SACMEX y el LIA-UNAM de la PTAR Cerro de la Estrella, para temporada de lluvias, estiaje y general.	132
Tabla 5.21. Comparación de la remoción de contaminantes, obtenida por SACMEX y el LIA-UNAM de la PTAR Chapultepec, para temporada de lluvias, estiaje y general.....	132
Tabla 5.22. Comparación de la remoción de contaminantes, obtenida por SACMEX y el LIA-UNAM de la PTAR Santa Fe, para temporada de lluvias, estiaje y general.	132
Tabla 5.23. Remoción obtenida de la PTAR Ecoducto, obtenida en el LIA-UNAM para temporada de lluvias y estiaje.	133
Tabla 5.24. Comparación de la remoción de contaminantes con base en los datos generales del LIA-UNAM.	133

ANEXOS.

Tabla A.1. Datos obtenidos de la caracterización fisicoquímica de agua influyente en temporada de lluvias y estiaje, con su respectiva desviación estándar de las PTAR estudiadas.....	140
Tabla A.2. Datos obtenidos de la caracterización fisicoquímica de agua efluente en temporada de lluvias y estiaje, con su respectiva desviación estándar de las PTAR estudiadas.....	141

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México, la casi totalidad del tratamiento de las aguas residuales municipales generadas está a cargo del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). Se trata del organismo que por ley tiene a su cargo la infraestructura hidráulica, los servicios al público de suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, así como el reúso de aguas residuales tratadas. Existen además pequeñas plantas de tratamiento a cargo de particulares, ya sea para cumplir con la normativa de descarga al drenaje o bien para reutilizar el agua tratada en riego de áreas verdes de su propiedad.

El sistema de drenaje de la Ciudad de México cuenta con 177 kilómetros de túneles profundos, Túnel Emisor Central y el Túnel Emisor Oriente, con diversos interceptores. En ellos se descargan las redes primarias (2,446 km) y secundarias (11,644 km) del complejo sistema de drenaje de la ciudad. A lo anterior se suman estaciones pluviográficas y cauces. El objetivo de toda esta infraestructura es conducir y desalojar las aguas residuales y pluviales, mediante estaciones de bombeo y por gravedad, fuera de la cuenca del Valle de México.

Por otra parte, el subsuelo arcilloso de la ciudad presenta condiciones muy particulares, que caracterizan al suelo lacustre de la ciudad como altamente compresible. Debido a ello, el funcionamiento de la red de drenaje se ve afectado por la presencia de hundimientos diferenciales que generan contrapendientes que invierten el sentido del escurrimiento y, en casos más severos, la fractura de los conductos y fugas de agua. La Ciudad de México presenta además condiciones de estrés hídrico. En ese contexto, proporcionar los servicios hidráulicos que demanda su población es una tarea sumamente compleja.

La red de drenaje combinado (aguas residuales y aguas pluviales) con que cuenta la ciudad hace particularmente problemático el desalojo de las aguas en temporada de lluvias, ya que se presentan inundaciones que afectan a la población y a la infraestructura de la ciudad. Además, las instalaciones de tratamiento se ven afectadas por los cambios en la calidad del agua que ingresa al sistema, debido a la aportación pluvial.

El alcance del presente proyecto se restringe al estudio (análisis de parámetros fisicoquímicos) de las aguas residuales municipales crudas y tratadas (influyente y efluente) generadas en temporada de secas y lluvias en la Ciudad de México, relacionadas con cuatro PTAR elegidas en diferentes alcaldías. El análisis de la información tiene además la finalidad de comparar las diferentes tecnologías de tratamiento empleadas en las PTAR estudiadas y corroborar el cumplimiento de las normas para un agua residual tratada con fines reúso seguro.

CAPÍTULO 2. POBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

En la actualidad uno de los problemas ambientales y de salud más graves que se enfrentan a nivel mundial y en México es la falta de acceso a los servicios de agua potable y saneamiento. El consumo de agua potable en diferentes comunidades como: la agricultura, la industria, los comercios, el hogar y el transporte, sumado a los problemas del cambio climático está provocando que el agua se convierta rápidamente en un recurso escaso (Yap *et al.*, 2019).

La fracción líquida que desechan las comunidades urbanas (aguas residuales) son esencialmente el agua que ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales se empleó. De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales de México publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 1992, se pueden definir las aguas residuales como aguas de composición variada, provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas. A los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales que ingresan a los sistemas de alcantarillado.

Las aguas residuales se recogen en comunidades o municipios para ser conducidas, en última instancia a cuerpos de agua receptores para su posterior tratamiento. Este se realiza en plantas de tratamiento de aguas residuales, que siguen una serie de procesos enfocados a controlar los principales parámetros de calidad del agua tales como turbidez, color, pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), carbono orgánico total (COT), formas de nitrógeno, fósforo, coliformes fecales totales, entre otros, y que son regulados por las normativas de descarga locales o nacionales.

Las aguas residuales municipales afectan severamente la calidad del agua si se descargan sin previo tratamiento. Sus principales contaminantes son el nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos y microorganismos, entre otros (Jiménez *et al.*, 2010). Estos representan riesgos a la salud pública y al cuerpo receptor de la descarga. Se estima que a nivel mundial entre 80 y 95% del agua residual se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos sin recibir tratamiento previo (CONAGUA, 2017).

En México, entre los años 2000 y 2005 el volumen de descargas generado de aguas residuales municipales aumentó poco más del 6% (pasando de 250 a 265.6 m³/s); tendencia que se revirtió a partir de 2006. Para 2016, se redujo el volumen de aguas residuales provenientes de las descargas municipales con un caudal aproximado de 228.9 m³/s, de las cuales se colectaron en los sistemas de alcantarillado (212 m³/s; 92.6% del generado) y se trataron (123.6 m³/s; 58.3% del colectado, CONAGUA, 2017). Sin embargo, en el año 2019 – 2020 la descarga de

aguas residuales municipales aumentó su caudal con un volumen de (250.5 - 279.8 m³/s) respectivamente.

La generación de aguas residuales y su aumento, tiene una relación con el producto interno bruto (PIB): las entidades que contribuyen con el mayor porcentaje al PIB nacional también son las que generan mayores descargas de aguas residuales, como son los casos de la Ciudad de México y el estado de México; en contraste, estados como Colima, Nayarit, Tlaxcala, Baja California Sur y Oaxaca, con menores aportaciones al PIB nacional (INEGI, 2018) generaron comparativamente menores volúmenes de aguas residuales de origen municipal.

A nivel nacional, el incremento en la descarga de aguas residuales a través de los años se debe, al crecimiento sin planeación de las ciudades, el aumento en el número de sus habitantes y el alto requerimiento del sector agrícola e industrial. Sin embargo durante la pandemia por el virus SARS-CoV-2 (año 2020), el consumo de agua se incrementó entre un valor del 20 - 50% (CONAGUA, 2021), como se muestra en la Figura 2.1.

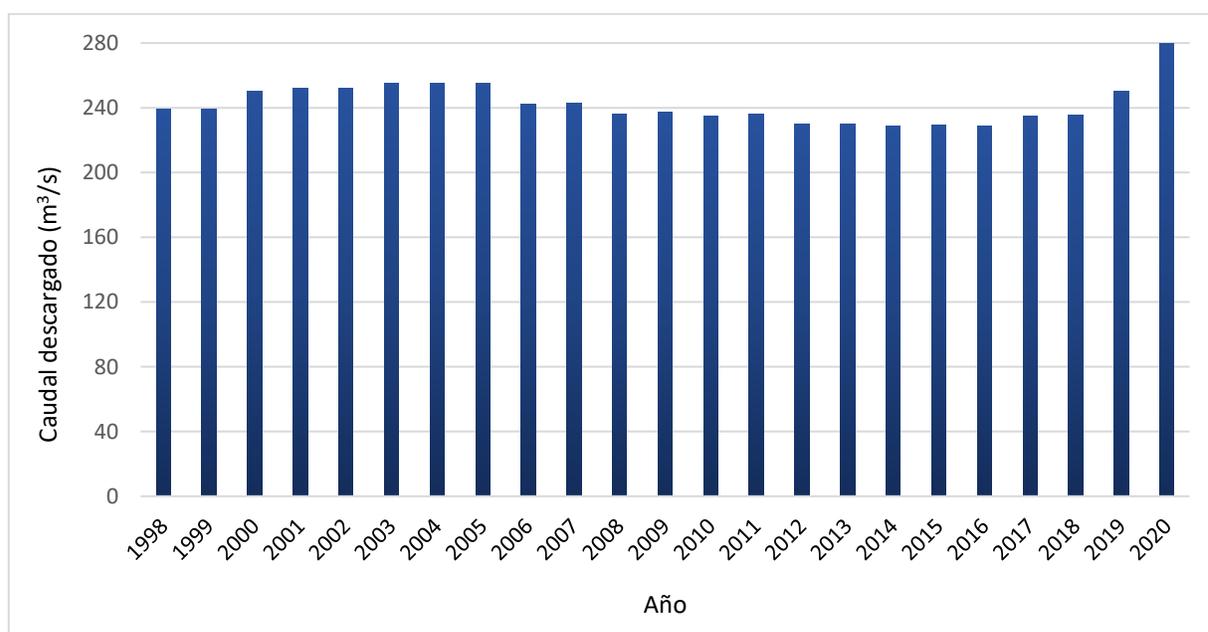


Figura 2.1. Descarga de aguas residuales municipales en México (CONAGUA, 2020).

Con base en lo anterior, el aumento en la descarga de aguas residuales resulta un problema en el drenaje combinado de la ciudad, ya que en temporada de lluvias se sobrecargan las tuberías para desalojarla y la infraestructura con la que se cuenta no es suficiente para tratarlas. Por lo que, el suministro de agua potable, alcantarillado y tratamiento del agua residual deben tener una mayor prioridad a nivel municipal y estatal. La necesidad de reutilizar de forma segura las aguas residuales tratadas para su intercambio por agua de primer uso cuando esto sea posible, debe planificarse y llevarse a cabo en todas las regiones del país con escasez de agua.

El desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de agua residual continúa avanzando para fomentar su reutilización, cumpliendo con la calidad requerida de las aguas residuales tratadas.

A pesar de las estrictas regulaciones y normas gubernamentales a nivel local y nacional para el tratamiento y disposición final de las aguas residuales, la cantidad de contaminantes que ingresan al medio acuático es alarmante debido a su gran volumen y degradación inadecuada (Jain, 2018). Asimismo, con la infraestructura suficiente para el tratamiento de las aguas residuales, se puede erradicar en parte el problema de la contaminación del agua en las áreas urbanas (Central Pollution Control Board, 2020).

2.1. ESTRÉS HÍDRICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

La escasez de agua es uno de los mayores problemas a nivel mundial y se le conoce como estrés hídrico. Este se presenta en diversos grados, siendo del 100% cuando la demanda de agua potable iguala a la cantidad disponible. Los lugares con menos de 2 500 m³ de agua por habitante en un año son sitios que ya presentan cierto grado de estrés hídrico. En México se tiene en promedio alrededor de 4 000 m³ de agua por persona, lo que supondría que las condiciones son buenas. Sin embargo, más de la mitad del país posee niveles muy bajos del recurso (zona centro y norte), mientras que en el sureste hay sobradamente más agua de la que se consume, lo cual en ocasiones implica inundaciones. (Fundación UNAM, 2021).

En la Ciudad de México y la zona metropolitana las redes de agua potable tienen pérdidas cercanas al 40% dentro de la red. Algunos de los principales problemas que genera la escasez de agua en ciertas zonas se identifican en la Figura 2.2. Es urgente disminuir estas afectaciones, hacer un buen uso de los acuíferos, incrementar la sustitución de agua potable por agua tratada y, eventualmente, conducir agua de una fuente externa de abastecimiento para evitar la escasez.



Figura 2.2. Causas y efectos de estrés hídrico en la Ciudad de México (Fundación UNAM, 2021).

Una de las principales razones por las que el agua se torna escasa es el aumento en la demanda, debido al incremento de la población y de las actividades económicas, la industria, y la generación de energía eléctrica que conlleva. En este contexto, existe una alteración en las cuencas hidrológicas debido a la actividad humana, la deforestación, urbanización, y otras operaciones que cambian el régimen hidrológico.

Por lo que se refiere a la Ciudad de México, las fuentes locales (el acuífero) se encuentra sobreexplotado, fenómeno que obliga a traer el agua de cuencas lejanas, lo que implica un costo elevado. Recientemente, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México anunció un incremento del 35% en el pago del agua en 165 colonias, si el consumo de los hogares excede los 60 mil litros de consumo en seis meses (SACMEX, 2021).

Por otro lado, la Comisión Nacional del Agua otorga concesiones a particulares, industrias y organismos operadores para usar las aguas de propiedad nacional a cambio del pago de ese derecho. Las tarifas de agua son fijadas de forma diferente en cada municipio, e incluyen los costos de abastecimiento de agua (captación, potabilización y traslado), alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

2.2. AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Las aguas residuales municipales son descargadas de diversas corrientes a los sistemas de drenaje urbanos. Están compuestas por una gran variedad de sustancias contaminantes como son: productos químicos, materia orgánica, nutrientes de detergentes, jabones limpiadores, heces y orinas. Provenientes de residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales.

Con frecuencia, esta corriente de agua de desecho se mezcla con aguas subterráneas infiltradas en la red, o bien aguas superficiales o de lluvia en el caso de que los drenajes sean combinados (Noyola, *et al.* 2013). Debido a este tipo de drenaje, se determinan los procesos de tratamiento necesarios para una descarga de aguas residuales que permitan dar cumplimiento a la normatividad ambiental, o en su caso el agua residual tratada reutilizarla en actividades que lo permitan.

2.2.1. Variación estacional y tipo de drenaje de agua residual en la Ciudad de México

El drenaje (Figura 2.3.) es el medio por el cual se retira del terreno el exceso de agua no utilizable y se conforma de cualquier estructura, natural o artificial, que facilite el escurrimiento y evita el almacenamiento del agua en una zona particular.

La red de drenaje de la Ciudad de México es sólo una parte del sistema hidrológico de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), un sistema complejo, cuya finalidad es drenar una cuenca hidrológica cerrada, que originalmente formaba un sistema lacustre integrado por cinco grandes lagos: Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco, con poca pendiente e impermeable (CENAPRED, 2019).

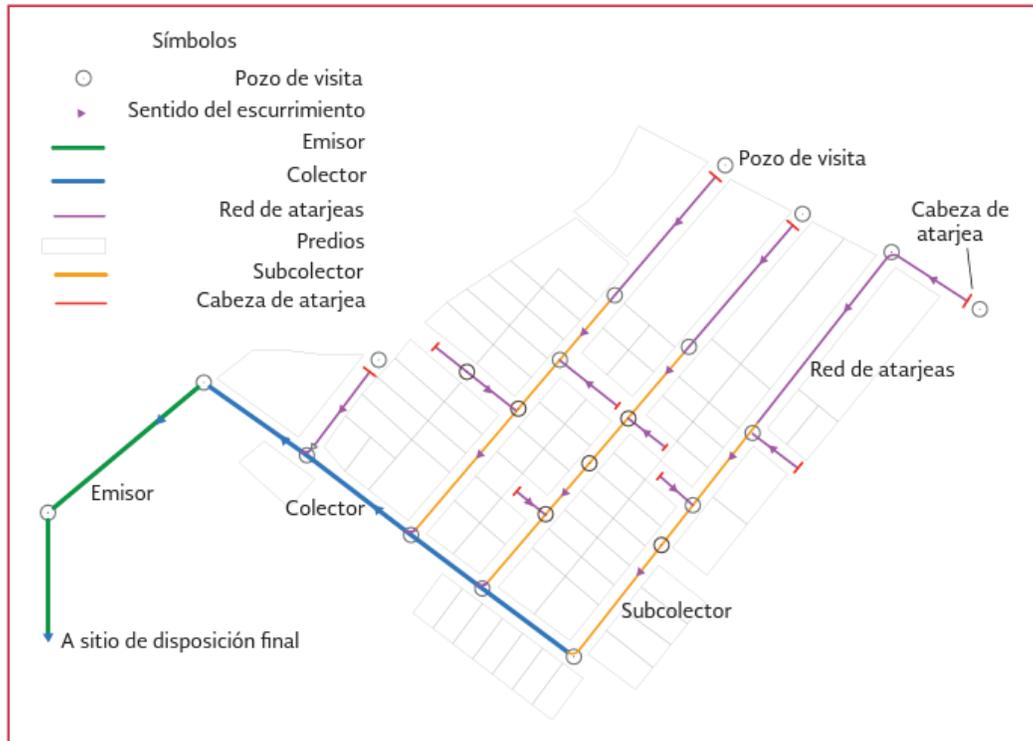


Figura 2.3. Ejemplo de un sistema de drenaje (CONAGUA, 2019).

En general el sistema de drenaje de la Ciudad de México es de tipo combinado donde se mezclan las aguas residuales y pluviales de la ciudad, está formado por tres tipos de estructuras hidráulicas: redes secundarias y primarias con características específicas descritas en la Tabla 2.1. y túneles e interceptores que drenan el agua fuera de la ciudad, descritos a continuación.

Tabla 2.1. Características de la red secundaria y primaria de la CDMX.

Red secundaria	Red primaria
<ul style="list-style-type: none"> ❖ La red secundaria es un conjunto de sistemas de atarjeas que recolectan las aguas residuales y pluviales provenientes de las descargas domiciliarias. ❖ En general, este tipo de red está integrada por conductos cuyo diámetro máximo es de 45 centímetros y está formado por más de 11,644 km. ❖ En el año 2000, el nivel de cobertura en el área urbanizada de la zona metropolitana del valle era del 92%. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ La red primaria es un drenaje de tipo combinado, conduce agua residual y pluvial con más de 2,446 km. ❖ Está formada por 128 sistemas de colectores, de los cuales 108 están ubicados en la CDMX, mientras que 20 se localizan en el Estado de México. ❖ La red está auxiliada por 303 plantas de bombeo, 12 tanques de tormenta, 22 sifones, 13 lagunas de regulación y un sistema de interpresas integrado por 29 presas.

A lo largo del tiempo, la infraestructura para drenar las aguas residuales y de lluvia de la ZMVM (Figura 2.4.) ha evolucionado. El sistema general de desagüe actualmente consta del gran canal de desagüe y tres conductos principales descritos a continuación:

- ❖ **Gran Canal de Desagüe:** Que, en su origen, constaba de obras como el albarradón de Nezahualcóyotl en 1449, el Tajo de Nochistongo concluido en 1781 y la obra del Primer Túnel de Tequixquiac que en 1900 se inaugura junto con el Gran Canal de Desagüe. Estas obras en aquel tiempo evitaron inundaciones mayores en la ciudad.
- ❖ **Túnel Emisor Poniente (TEP):** Ante la insuficiencia del Gran Canal para poder controlar las inundaciones de la Ciudad de México y no satisfacer sus requerimientos como sistema de drenaje, se decidió comenzar con la construcción del túnel en el año 1962.
- ❖ **Túnel Emisor Central (TEC):** (conocido como Drenaje Profundo), es el componente principal de otros interceptores, con una capacidad de 200 m³/s, inició su operación en 1975.
- ❖ **Túnel Emisor Oriente (TEO):** puesto en operación en 2020 con una capacidad promedio de 150 m³/s y extensión de 62 km.

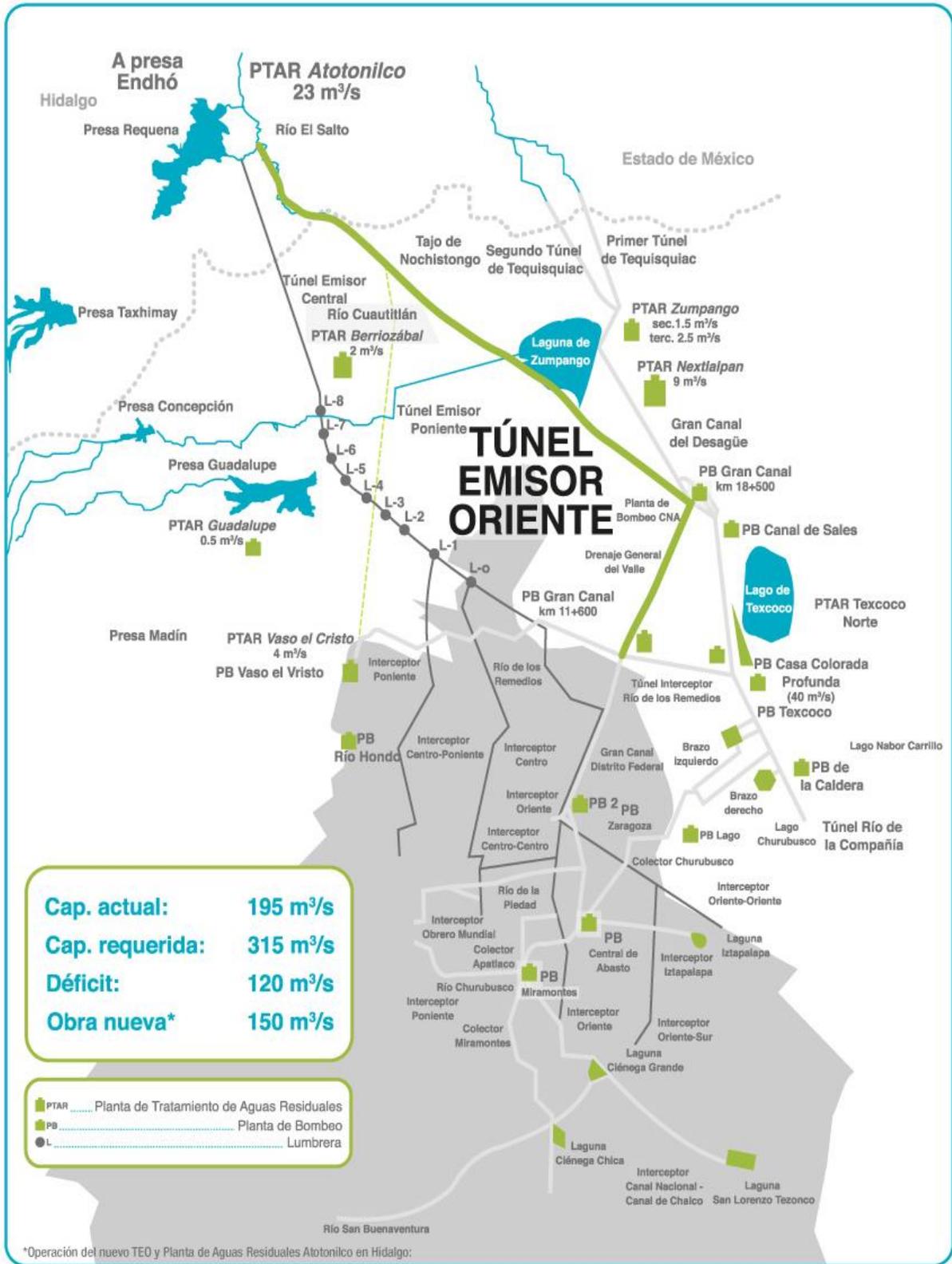


Figura 2.4. Sistema de drenaje de la Ciudad de México (SACMEX, 2021).

Sin embargo, el crecimiento poblacional, los cambios en la cuenca y en particular el hundimiento del Valle de México, entre otros múltiples factores, han reducido la eficiencia en el funcionamiento del sistema hidrológico. Por lo que, la capacidad del sistema de drenaje de la zona metropolitana es insuficiente y presenta serios problemas.

Actualmente, debido al constante hundimiento de la Ciudad de México, el Gran Canal del Desagüe ha perdido la pendiente que le permitía descargar por gravedad, por lo que drena la parte baja de la ciudad con el apoyo de 12 plantas de bombeo hacia los Túneles de Tequisquiatic (Figura 2.5.) para seguir su curso hasta la cuenca del río Tula y abastecer los canales de riego agrícola.

Este hundimiento en la ciudad hizo que el canal se redujera un 30% comparado con la capacidad que tenía en 1975, originado por la sobreexplotación de los mantos acuíferos del Valle de México (CONAGUA, 2007).

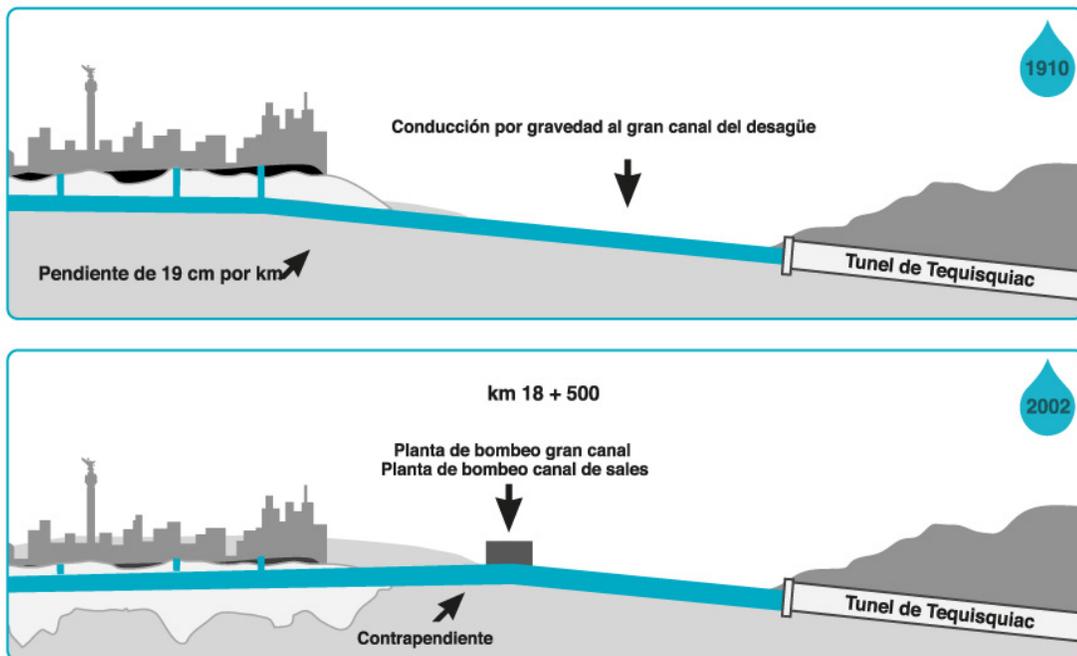


Figura 2.5. Comparativa del desalojo de agua residual en la CDMX 1910 – 2002 (SACMEX, 2016).

El Túnel Emisor Central es el ducto del cual se desalojan las aguas residuales y pluviales de la CDMX, pero en su diseño original era necesario cerrarlo durante los meses de estiaje para su reparación y mantenimiento. Desde hace varios años, ante la limitada infraestructura de desalojo de la ZMVM, no ha sido posible liberar el Emisor Central para su inspección y mantenimiento. Esto planteó la urgente necesidad de disponer un emisor alternativo que permita mantener la capacidad de operación del sistema durante todo el año (CONAGUA, 2007).

En 2009 se inició la construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO) ubicado en la Figura 2.4. que actualmente desaloja una importante fracción de las aguas residuales de la Ciudad de México.

De esta forma se cuenta con un drenaje alterno que, si llegara a colapsar el Emisor Central, evitará una inundación, además que proporciona mayor flexibilidad a la operación y mantenimiento del sistema de drenaje del Valle de México (Escudero, 2020). Esta obra es considerada como una de las más grandes del mundo en su tipo y comenzó a operar en su totalidad en 2020.

Finalmente, debido al drenaje combinado que existe en la Ciudad de México, la eficiencia de los procesos para el tratamiento de aguas residuales puede verse afectada por la influencia de diversos factores relacionados con la incorporación de la precipitación y el escurrimiento superficial, variando entre las estaciones de estiaje y lluviosa.

2.2.2. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica, así como de contaminantes prioritarios (metales pesados) y emergentes (compuestos orgánicos) de interés para la protección de la salud y del ambiente. Las normas que regulan las descargas a cuerpos receptores especifican la reducción de materia orgánica, nutrientes, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual, entre otros parámetros.

Para la caracterización del agua residual se emplean métodos de análisis cuantitativos gravimétricos, volumétricos, fisicoquímicos e instrumentales tales como: colorimetría, potenciometría, espectrometría de absorción, espectroscopía y radiación nuclear, para una determinación precisa de la composición química del agua residual.

En los análisis de calidad del agua se utilizan técnicas estandarizadas que pueden encontrarse en las normas oficiales y en la publicación de referencia en la materia *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association, 2012) con una explicación detallada de cada uno de los procedimientos que a continuación se describen:

Temperatura y conductividad

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua del suministro, principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año, y solo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano.

La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como la aptitud para ciertos usos.

La conductividad eléctrica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, movilidad, carga y concentraciones relativas, así como de la temperatura. La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización o contenido de sales del agua residual. El valor de conductividad es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores. También es un parámetro importante de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano.

Turbiedad y color

La turbiedad, como medida de las propiedades de transmisión de la luz en el agua se relaciona con la materia coloidal y residual en suspensión (sólidos suspendidos). La medición de este parámetro es sencilla ya que se emplea un equipo “turbidímetro”, que funciona con un detector óptico y una fuente de luz. La absorbancia que presenta el agua analizada está en función de la concentración de las partículas suspendidas.

El agua residual municipal reciente suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro. En la mayoría de los casos dicho fenómeno se debe a la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales presentes en el agua.

pH y alcalinidad

La concentración del ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos; por otro lado, el efluente puede modificar la concentración del ion hidrógeno en las aguas naturales si está no se modifica (neutraliza) antes de su evacuación final.

El pH de los sistemas acuosos puede medirse con un potenciómetro, para este procedimiento se emplean soluciones indicadoras de pH para la calibración del instrumento. También se pueden utilizar tiras de pH que cambian de color a determinados valores de pH que identifican el valor de la muestra de agua.

La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de carbonatos y bicarbonatos de las disoluciones de los cationes como el calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. De todos, los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La alcalinidad ayuda a regular los cambios de pH producidos por la adición de ácidos. Normalmente, el agua residual fresca es ligeramente alcalina, propiedad que adquiere de las aguas de tratamiento, agua subterránea y los materiales añadidos en los usos domésticos.

La alcalinidad se determina por titulación con un ácido normalizado, por ejemplo; ácido sulfúrico, expresándose los resultados en carbonato de calcio (CaCO₃). La concentración de alcalinidad en un agua residual es importante en aquellos casos en los que empleen tratamientos químicos, en la eliminación biológica de nutrientes y cuando haya que eliminar el amoníaco mediante arrastre por aire.

Nitrógeno total Kjeldahl, orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos.

El contenido total (NT) en nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoniacal, nitrito y nitrato. El nitrógeno total Kjeldahl (NTK) sólo incluye la fracción orgánica y amoniacal. El contenido en nitrógeno orgánico se determina previa destilación (ebullición) de la muestra acuosa con el objeto de eliminar el amoníaco (condensado), para dar paso a la digestión en el que el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco.

El nitrógeno amoniacal se encuentra en solución acuosa, bien en forma de ion amonio o como amoníaco en las aguas residuales en función del pH, de acuerdo con la siguiente ecuación de equilibrio:



El nitrógeno amoniacal, como iones amonio o como amoníaco libre, es el contaminante nitrogenado que se encuentra con mayor frecuencia, ya que además de ser un producto natural de descomposición, es un producto industrial clave. El amoníaco reduce la efectividad en la cloración, que se usa como etapa final del tratamiento para eliminar trazas de materia orgánica y microorganismos patógenos. Además, ejerce una demanda muy alta de oxígeno, requiriendo más de 4.5 veces su propio peso de oxígeno para su completa oxidación a nitratos.

El nitrógeno del nitrito, cuya determinación se realiza colorimétricamente, es relativamente inestable y fácilmente oxidable a la forma del nitrato. Es un indicador de la contaminación anterior al proceso de estabilización y raramente excede la cantidad de 1 mg/L en el agua residual y 0.01 mg/L en aguas subterráneas y superficiales. A pesar de que su presencia suele darse en concentraciones pequeñas. Los nitritos presentes en los efluentes de aguas residuales se oxidan por adición al cloro, lo cual aumenta la cantidad de cloro a dosificar y por lo tanto el costo de la desinfección.

El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales. El contenido en nitratos en aguas de abastecimiento no puede superar los 45 mg/L como (NO₃⁻) dadas sus graves y ocasionalmente, fatales consecuencias sobre los niños. La concentración de nitratos en aguas residuales puede variar entre 0 y 20 mg/L en forma de nitrógeno con valores típicos entre 15 y 20 mg/L. La concentración de nitratos también suele determinarse por métodos colorimétricos.

Fósforo total y ortofosfatos

El fósforo es esencial para el crecimiento de los vegetales y otros organismos. Debido a que en aguas superficiales tienen lugar proliferaciones nocivas incontroladas de algas, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de compuestos de fósforo que alcanzan las aguas superficiales por medio de vertidos de aguas residuales domésticas, industriales y a través de las escorrentías naturales. Las aguas residuales municipales contienen fósforo (como P) que puede variar entre 4 y 15 mg/L.

Las formas más frecuentes en las que se presenta el fósforo en soluciones acuosas incluyen al ortofosfato, polifosfato y los fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos como el PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- y H_3PO_4 , por ejemplo, se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin que sea precisa una ruptura posterior. Los ortofosfatos incluyen moléculas con un átomo de fósforo, átomos de oxígeno y en determinados casos, átomos de hidrógeno combinados con moléculas complejas.

La determinación del ortofosfato puede llevarse a cabo añadiendo directamente alguna sustancia que origine un complejo coloreado con el fosfato como puede ser el molibdato amónico. Determinar la cantidad de polifosfatos y fosfatos inorgánicos es un método que se lleva a cabo con un proceso de digestión en medio ácido.

Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)

Los surfactantes aniónicos son actualmente más utilizados, ya que se incorporan a la mayoría de las fórmulas de detergentes y productos de limpieza de uso cotidiano. Los tipos de sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS) de cadena han sido los surfactantes sintéticos más utilizados durante más de 30 años, con un consumo mundial estimado de 2,8 millones de toneladas para el año 1998 (Ying, 2006).

Estos surfactantes ingresan a las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde se degradan parcialmente de forma aerobia y se adsorben parcialmente en los lodos de las aguas residuales que eventualmente se aplican en la tierra. Finalmente, se vierten en los cursos de agua y en el suelo, donde constituyen algunos de los principales factores que afectan al ecosistema natural (McEvoy y Giger, 1985).

Su determinación se realiza mediante métodos espectrofotométricos con azul de metileno, siendo este método estándar el utilizado para determinar los agentes superficiales en muestras de agua del grifo. Sin embargo, este método oficial no sólo es largo y tedioso, sino que también requiere grandes cantidades de cloroformo y de muestra.

El método se basa en la formación de un par iónico entre los tensoactivos aniónicos (AS), y el azul de metileno (MB), según la reacción:

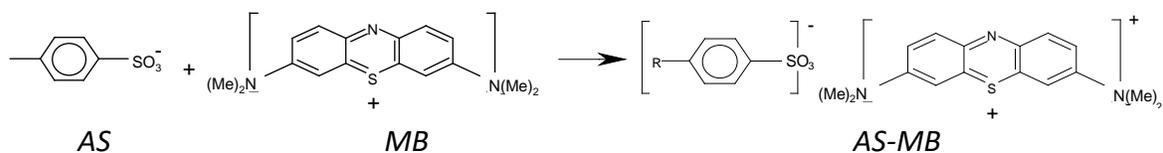


Figura 2.6. Reacción de complejación del sulfonato de alquilbenceno lineal con azul de metileno.

Para ello es necesario realizar tres extracciones sucesivas del contenido de AS-MB en 100 mL de muestra previamente alcalinizada con 15, 10 y 10 ML de cloroformo. El par iónico se determina por espectrofotometría, midiendo la absorbancia a 650 nm.

Se han propuesto métodos simplificados que reducen las cantidades de reactivo utilizando un determinado tipo de adsorbente Moskvin *et al.*, 1996 o reduciendo el volumen de muestra y de reactivos utilizados Koga *et al.*, 1999. Sin embargo, estos métodos también implican procedimientos tediosos sin eliminar la etapa de filtración.

Jurado *et al.*, 2006; propone una simplificación del método espectrofotométrico del azul de metileno, utilizado para determinar surfactantes aniónicos en aguas residuales. Este procedimiento se realizó en el presente proyecto y es descrito en el Capítulo 4.

Metales pesados

Muchas aguas residuales contienen cantidades a nivel traza de diversos metales. Entre ellos destacan níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio.

Muchos de estos metales están clasificados como contaminantes prioritarios. Algunos de ellos son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica y la ausencia en cantidades suficientes de ellos podrían limitar, por ejemplo, el crecimiento de bacterias y algas. Sin embargo, debido a su toxicidad, la presencia de cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá con diversos usos del agua.

Las concentraciones de muchos de estos metales pueden determinarse a partir de valores muy bajos empleando métodos instrumentales entre los que cabe destacar la espectroscopía por absorción atómica.

Sólidos totales, suspendidos y disueltos (totales, volátiles y fijos)

Todas las aguas residuales contienen sustancias en suspensión y disueltas en cantidades variables que dependen de su origen. Este parámetro, en sus componentes totales, volátiles y fijas (cenizas), se determina por gravimetría mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas. Los sólidos se clasifican en tres grupos (totales, suspendidos y disueltos) y cada uno en sus fracciones volátiles y fijas, que sumadas representan los sólidos totales.

Sólidos Totales (ST): Es el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sólidos Totales Volátiles (STV): Cantidad de materia orgánica que se volatiliza por el efecto de la calcinación a $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$.

Sólidos Totales Fijos (STF): Es la diferencia entre los ST y los STV, siendo el residuo remanente que permanece después de la calcinación a $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$.

Sólidos Suspendidos Totales (SST): Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de $1.5\text{ }\mu\text{m}$ secado a una masa constante a temperatura de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV): Son aquellos sólidos suspendidos que se volatilizan en la calcinación a $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$.

Sólidos Suspendidos Fijos (SSF): Es la diferencia entre los SST y los SSV, siendo el residuo remanente que permanece después de la calcinación a $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$.

Sólidos Disueltos Totales (SDT): Es el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con poro de $1,5\text{ }\mu\text{m}$ a una temperatura de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

Sólidos Disueltos Volátiles (SDV): Son los sólidos que son volatilizados e incinerados cuando los sólidos disueltos totales son calcinados $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$.

Sólidos Disueltos Fijos (SDF): Es la diferencia entre los SDT y los SDV, siendo el residuo remanente que permanece después de la calcinación a $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

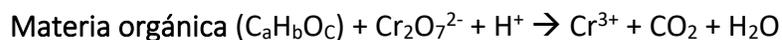
La DBO a cinco días (DBO_5) es el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente utilizado, aplicable tanto en aguas residuales como aguas superficiales. La determinación está relacionada con la medición de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica. El extendido uso del ensayo de DBO, este sujeto a ciertas limitaciones.

En la prueba estándar de DBO, se coloca un volumen determinado de agua residual en una botella de 300 mL. la botella se completa a volumen total utilizando agua saturada con oxígeno y con los nutrientes necesarios para el crecimiento biológico. Debe medirse la concentración inicial del oxígeno disuelto, después de incubar la muestra cinco días a una temperatura de 20 °C se mide la concentración de oxígeno final. La DBO de la muestra es la diferencia entre los valores de concentración de oxígeno disuelto, expresado en miligramos por litro, dividido por la fracción decimal del volumen de muestra usada.

Demanda química de oxígeno (DQO)

El ensayo de DQO se emplea para la medición de la materia orgánica presente en aguas residuales tanto industriales como municipales y que eventualmente contengan compuestos tóxicos para la vida biológica. En el ensayo se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse.

El dicromato de potasio proporciona excelentes resultados en este sentido. El ensayo debe hacerse a elevadas temperaturas (150°C) y para facilitar la oxidación de determinados tipos de compuestos orgánicos es preciso emplear un catalizador (sulfato de plata). La principal reacción química que tiene lugar puede expresarse, de manera esquemática en el siguiente modo:



La DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, siendo esto debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica, además de que la DQO los oxida totalmente, que puede no ser el caso de la DBO (prueba limitada a 5 días). Una vez establecida la correlación entre ambos parámetros DBO y DQO para determinada agua residual, puede emplearse para el funcionamiento y control de las plantas de tratamiento.

Carbono orgánico total (COT)

Otro método para medir la materia orgánica presente en el agua es el método COT, especialmente indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica. Esta prueba consiste en la inyección de microlitros de una muestra de agua residual en un tubo que contiene un catalizador y que se mantiene a 900 °C. El dióxido de carbono producido por la oxidación de cualquier materia carbónica presente es detectado por un analizador infrarrojo. El carbono inorgánico, como los carbonatos, se puede eliminar antes de la oxidación o medirse para su discriminación. Se debe recordar que, aunque el carbono orgánico es la principal fuente en la demanda de oxígeno, no es la única entre los compuestos orgánicos.

Contaminantes Emergentes

Los contaminantes orgánicos, conocidos como contaminantes emergentes (CE), han adquirido mayor interés en la actualidad, ya que se ha descubierto que no sólo degradan significativamente la calidad del agua, sino que también plantean grandes desafíos a los sistemas de tratamiento de agua existentes en términos de la eficiencia de su eliminación (Rathi *et al.*, 2021).

Los CE se introdujeron al ambiente en el siglo XIX, gracias a los avances de la ciencia y la tecnología (Miraji *et al.*, 2016). Los CE incluyen productos como los analgésicos, antibióticos,

fármacos estimulantes, reguladores de lípidos, diuréticos, antiinflamatorios no esteroideos (AINE), antisépticos, agentes de protección solar, antimicrobianos, betabloqueantes, cosméticos, productos de transformación, complementos alimenticios, las fragancias y sus metabolitos, además de varios productos de uso en procesos industriales y agropecuarios. Estos productos aumentan la vulnerabilidad de los ecosistemas y la salud humana (Ahmed *et al.*, 2017, Gomes *et al.*, 2020, Mohapatra y Kirpalani, 2019, Sharma *et al.*, 2019).

Cualquier producto químico, microorganismo natural o sintético que no se controle regularmente en el ecosistema puede causar impactos peligrosos adversos en la salud humana y/o el medio ambiente (Mofijur *et al.*, 2021).

Los CE suelen estar presentes en los vertidos de las PTAR, plantas industriales, instituciones sanitarias y las zonas residenciales, así como en las escorrentías agrícolas y los lixiviados de los vertederos (Murgolo *et al.*, 2017, Norvill *et al.*, 2016). Estos pueden provenir de diversas fuentes y persistir en el agua en concentraciones de ng/L o µg/L (Kapelewska *et al.*, 2018).

El interés por los CE ha crecido en las dos últimas décadas debido a que degradan la calidad del agua, el avance de las técnicas analíticas como la microextracción en fase sólida (SPME), la extracción en fase sólida (SPE), la cromatografía líquida de ultra alto rendimiento (UHPLC), la cromatografía líquida-espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS) y la cromatografía líquida de alto rendimiento-espectrometría de masas acoplada (HPLC-MS), ha mejorado la determinación de estos compuestos, ya que permite la detección a muy bajas concentraciones en el agua residual, el suelo, la atmósfera y los sedimentos (Galindo-Miranda *et al.*, 2019, Lofrano *et al.*, 2020).

2.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

La formulación, planeación, selección y diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar la disponibilidad de recursos económicos y técnicos, las características del agua residual a tratar con relación a las variaciones de caudal, tipo y concentración de contaminantes, los criterios establecidos para la descarga del efluente tratado a un cuerpo receptor o bien para su eventual uso (Noyola *et al.*, 2013).

2.3.1. Tratamiento preliminar

El propósito del pretratamiento es remover aquellos constituyentes del agua residual que puedan causar problemas operacionales y de mantenimiento en el proceso de tratamiento. El tipo de componentes a eliminar son de gran y mediano volumen como ramas, piedras, animales muertos, plásticos, o bien problemáticos, como arenas, grasas y aceites.

El tratamiento se efectúa por medio de cribas o rejillas, desarenadores, flotadores o desgrasadores. En ciertas ocasiones se emplean trituradores para reducir el tamaño de ciertos desechos y reincorporarlos al tratamiento (Noyola *et al.*, 2013).

2.3.2. Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene como objetivo eliminar una fracción de sólidos suspendidos y materia orgánica del agua residual utilizando la fuerza de gravedad como principio. Esta eliminación suele llevarse a cabo mediante las operaciones físicas como el tamizado y la sedimentación (Noyola *et al.*, 2013).

Los tanques de sedimentación primaria pueden ser rectangulares o circulares y por lo general están diseñados para proporcionar de una a tres horas de tiempo de retención. En un tanque con ese tiempo de retención puede eliminar un 60% de sólidos suspendidos y un 30% de DBO. El tratamiento primario se considera como una antesala del tratamiento secundario.

2.3.3. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario mediante una serie de procesos biológicos se encarga de eliminar materia orgánica biodegradable (principalmente soluble), los microorganismos transforman en materia celular los contaminantes presentes en el agua residual.

Este proceso degrada activamente la materia orgánica, las células microbianas forman flóculos, los cuales son separados de la corriente de agua tratada, normalmente por sedimentación. De esta forma, una sustancia orgánica soluble se transforma en biomasa bacteriana (flóculos) que es fácilmente retirada del agua. En el caso del agua residual doméstica o municipal, el objetivo principal es reducir el contenido orgánico y, en ciertos casos, los nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo (Noyola *et al.*, 2013).

Los procesos biológicos para el tratamiento secundario se dividen en aerobios y anaerobios, descritos a continuación:

Procesos aerobios

Los procesos aerobios se realizan en presencia de oxígeno por lo que es necesario introducirlo en los tanques donde están las aguas residuales. En esta etapa ocurre parte de la degradación de la materia orgánica. Una mayor cantidad de energía del sustrato es utilizada para la síntesis celular, por lo que hay una mayor generación de biomasa como lodo no estabilizado, cuyo tratamiento y disposición incrementa la dificultad técnica y el costo del tratamiento.

Lodos activados convencionales

El proceso de lodos activados tiene como objetivo remover la materia orgánica de las aguas residuales. La remoción se logra por conversión biológica, en presencia de oxígeno por microorganismos que degradan la materia orgánica. Cuando la masa de microorganismos crece y es mezclada con la agitación introducida al tanque por medios mecánicos o de inyección de aire, ésta tiende a agruparse (floculación) para formar una masa activa de microorganismos denominada lodo activado; a la mezcla de este lodo con el agua residual se le llama licor mezclado (Noyola *et al.*, 2013).

El tanque de aireación tiene el siguiente proceso de funcionamiento que se encarga de los siguientes puntos:

- ❖ Produce lodo activado por la reproducción de microorganismos, debido a esto, debe mantenerse la concentración del tanque desechando una cierta cantidad de lodo; conocido como lodo de purga.
- ❖ En el reactor completamente mezclado, las partículas que entran al tanque son inmediatamente distribuidas en todo el volumen del reactor logrando una homogeneidad completa.
- ❖ La concentración de contaminantes en el reactor es, idealmente, la misma en todo el volumen del reactor y por lo tanto en su salida.
- ❖ El licor mezclado fluye del tanque a un clarificador secundario donde el lodo activado sedimenta.
- ❖ El oxígeno requerido para el funcionamiento del proceso se suministra por medio de aireadores mecánicos o difusores.

El proceso de lodos activados convencional consiste en los siguientes pasos:

- ❖ Tratamiento preliminar: tamizado y desarenado
- ❖ Decantador primario
- ❖ Tanque de aireación
- ❖ Decantador secundario
- ❖ Espesador de lodos
- ❖ Digestor de lodos
- ❖ Sistema de deshidratación de lodos

Lodos activados aireación extendida

El proceso de aireación extendida es una variante del proceso convencional de lodos activados, consistente en el empleo de:

- ❖ Altos tiempos de retención hidráulica
- ❖ Mayores concentraciones de lodos activados en el reactor
- ❖ Altos valores de la edad de lodos

Bajo estas condiciones, el proceso biológico opera en la fase de respiración endógena con mineralización, casi completa, de los lodos biológicos. Debido al alto tiempo de retención hidráulico empleado y alta concentración de lodos en el reactor, el proceso soporta fácilmente fluctuaciones tanto en la carga hidráulica como en la carga orgánica.

El reactor con aireación extendida es similar a uno completamente mezclado, excepto que no tiene sedimentador primario. El tiempo de retención hidráulico varía de 18 a 36 horas. Este periodo de aireación permite que las aguas residuales y lodo sean parcialmente digeridos en

el tanque aireador, lo que permite su disposición sin que sea necesaria la posterior estabilización de lodo.

La ventaja de esta variante es que simplifica considerablemente el manejo de lodos, aspecto importante sobre todo en pequeñas plantas de tratamiento. La desventaja inherente es que el costo por energía eléctrica es mayor por unidad de agua tratada en comparación con la variante convencional o completamente mezclada (Noyola *et al.*, 2013).

Membranas

Los reactores biológicos de membrana (MBR por sus siglas en inglés), se definen como una combinación de sistemas compactos: acoplando un reactor biológico (tanque de aireación mezclado) responsable de la biodegradación de la materia orgánica a través de microorganismos y un módulo de membranas ya sea de micro o ultrafiltración. Las primeras retienen partículas hasta 0.1 micras y las segundas hasta 0.01 micras, para la separación física sólido-líquido del licor mezclado.

Los módulos de membranas pueden ser externos al reactor o bien sumergidos en el mismo tanque. Las ventajas de este tipo de sistemas es la alta calidad de agua obtenida (libre de sólidos suspendidos y de microorganismos patógenos) y lo compacto de la instalación.

Sus desventajas son el costo de las membranas y el taponamiento que sufren, lo que implica procesos de limpieza frecuentes y una vida útil de dos o tres años en el mejor de los casos. En el estado actual de la tecnología, los reactores MBR no son adecuados para los requerimientos comunes de los sistemas operadores de agua y saneamiento municipales, salvo si se requiere producir un agua de reúso de alta calidad (Noyola *et al.*, 2013).

Procesos anaerobios

Los procesos anaerobios se realizan en ausencia de oxígeno; en este proceso ocurren reacciones fermentativas en las que la materia orgánica se transforma en energía, metano y dióxido de carbono. El proceso anaerobio se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana, es decir, una baja producción de lodos de desecho.

Por lo que representa una alternativa atractiva para el tratamiento de aguas residuales municipales, ya que ofrece ventajas importantes relacionadas con los bajos costos de operación debido a la mínima demanda de energía y la escasa producción de lodos. Aunque su desarrollo tiene más de tres décadas, su implementación en México aún es incipiente en aguas residuales de tipo municipal.

Sistemas de tratamiento anaerobio existentes:

- ❖ Fosa séptica
- ❖ Laguna anaerobia

- ❖ Tanque Imhoff
- ❖ Digestor baja tasa
- ❖ Digestor alta tasa
- ❖ Contacto anaerobio
- ❖ Filtro anaerobio
- ❖ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
- ❖ Lecho fluidificado

Humedales artificiales tipo "Wetland"

Son sistemas de tratamiento natural del agua, logrando la depuración mediante la vegetación existente. Llegan a ser un gran ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos, actúan como filtradores naturales de agua, esto se debe a que las plantas hidrófitas (tule, carrizo, espadaña, juncos, entre otras), que conforman al humedal, en sus raíces alojan una amplia diversidad de microorganismos que metabolizan los contaminantes.

Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento del agua residual:

- ❖ Sistemas de Flujo Libre (FWS)
- ❖ Sistemas de Flujo Subsuperficial (SFS)

Los humedales artificiales inicialmente fueron utilizados para la depuración de descargas con baja concentración de materiales orgánicos, o bien para el tratamiento de aguas grises. Durante los años noventa fueron diseñados para una diversidad de aplicaciones entre las que se incluyen el tratamiento de las aguas residuales municipales.

Para el año 2000, ya existía un gran número de agrupaciones científicas involucradas con el desarrollo y mejoramiento de la tecnología, con importantes avances en el conocimiento de los mecanismos físicos, químicos, biológicos e hidráulicos (Vymazal & Kröpfelová, 2008; Rodríguez, 2003).

Actualmente, en México existen humedales de flujo subsuperficial y se ha reportado una alta remoción de sólidos suspendidos (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno (N) y patógenos. No obstante, el desarrollo importante de la tecnología y de la acumulación de nuevo conocimiento, se tienen aún vacíos de conocimiento sobre los fenómenos que intervienen en la depuración del agua mediante estos sistemas, de tal manera que está presente la oportunidad para realizar nuevos estudios que permitan obtener mejores y más eficientes diseños (Kadlec & Wallace, 2009).

2.3.4. Tratamiento terciario o avanzado

El tratamiento terciario tiene como fin eliminar uno o varios contaminantes en particular, sólidos suspendidos, nutrientes y la materia orgánica remanente no biodegradable. Cualquier tipo de tratamiento avanzado debe ser posterior al tratamiento secundario.

Este tipo de tratamiento surge de requerimientos más estrictos para las descargas o el reúso de las aguas residuales. Algunos de los principales tratamientos de este tipo son:

- ❖ Ultrafiltración
- ❖ Microcribas
- ❖ Nitrificación biológica
- ❖ Nitrificación-desnitrificación biológica
- ❖ Desnitrificación biológica por etapas separadas
- ❖ Remoción de fósforo
- ❖ Cloración al punto de quiebre
- ❖ Intercambio iónico
- ❖ Ósmosis inversa
- ❖ Electrodialisis
- ❖ Adsorción con carbón
- ❖ Lodos activados con adición de carbón activado en polvo
- ❖ Oxidación química
- ❖ Precipitación química
- ❖ Volatilización

En tal caso, el arreglo de tratamiento terciario debe ser el necesario para alcanzar esa calidad específica, lo cual implica una gran diversidad de posibles combinaciones de operaciones y procesos unitarios.

2.3.5. Desinfección

Es la etapa de tratamiento encargada de la desactivación o destrucción de los organismos patógenos. Para que la desinfección sea efectiva, el agua residual que viene de procesos o etapas anteriores debe estar adecuadamente tratada. Los organismos potencialmente problemáticos en el agua residual incluyen bacterias, virus y protozoarios, así como todos aquellos microorganismos más comunes que se encuentran en el agua residual y los tipos de enfermedades humanas asociadas con los mismos.

Los sistemas tecnológicos aplicables en el proceso de desinfección más comunes y los equipos que se proponen para una etapa de desinfección son:

Cloro

Es el químico más utilizado en la etapa de desinfección porque destruye los organismos al ser inactivados mediante la oxidación del material celular. Tiene un efecto residual ya que permanece en el efluente del agua por tiempo prolongado, llevando a cabo aun la desinfección. Es muy confiable y efectivo en un amplio espectro de organismos patógenos. El cloro puede tener las siguientes presentaciones:

- ❖ Cloro gas
- ❖ Hipoclorito de sodio (disolución)
- ❖ Hipoclorito de calcio (pastillas)

Ultravioleta

Es un sistema que transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del microorganismo (ADN o ARN). Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, esta destruye la reproducción del mismo. La longitud de onda óptima para desactivar los microorganismos se encuentra entre el rango de 250 a 270 nm.

La intensidad de radiación emitida por la lámpara se disipa a medida que la distancia de la lámpara aumenta. Los componentes principales del sistema son las lámparas de vapor de mercurio, el reactor y los balastos electrónicos. A diferencia del cloro, se elimina la necesidad de generar, transportar, almacenar productos tóxicos, peligrosos y corrosivos; además, no tiene efecto residual que pueda afectar al ser humano u organismos acuáticos, ni requiere mayores espacios para su instalación. Sin embargo, esta característica impide prolongar el efecto desinfectante durante el transporte del agua por la red de distribución.

2.3.6. Remoción de contaminantes

La remoción de los contaminantes en las aguas residuales municipales se divide en diferentes procesos de tratamiento. En México los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales incluyen lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas, filtros biológicos, dual y otros.

A través de los sistemas de tratamiento, cada año se remueven cerca de 0.65 millones de toneladas de DBO₅ de los 2 millones de toneladas que se generan (CONAGUA, 2011). Estos sistemas de tratamientos de agua residual empelados en México tienen una eficiencia de entre 80 y 90% para la remoción de DBO₅, siempre que sean bien operados.

Las siguientes tablas, Tabla 2.2., 2.3., 2.4. y 2.5. Contienen un resumen de las características del proceso tratamiento de aguas residuales, el sistema utilizado y la materia eliminada (remoción de contaminantes) en cada etapa.

Tabla 2.2. Remoción de sólidos suspendidos, sedimentables y flotantes.

Materia eliminada	Sistema de tratamiento	Proceso de tratamiento	Características
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sólidos gruesos Arenas ✓ Sólidos densos ✓ Metales ✓ Espumas ✓ Aceites 	<ul style="list-style-type: none"> • Cribado Desarenadores • Sedimentadores • Flotadores 	Pretratamiento y tratamiento primario	Se encarga de ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos densos y en suspensión. Limpia el agua por decantación y rejillas de partículas cuyas dimensiones puedan obstruir los procesos siguientes.

Tabla 2.3. Remoción de materia orgánica biodegradable.

Materia eliminada	Sistema de tratamiento	Proceso de tratamiento	Características
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Materia orgánica soluble y coloidal 	<p>Sistemas aerobios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados • Sistema de lagunas de estabilización • Filtro percolador • Filtro sumergido aerobio • Reactor acoplado a membranas • Disco biológico rotatorio <hr/> <p>Sistemas anaerobios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fosa séptica • Laguna anaerobia • Tanque Imhoff • Digestor anaerobio convencional • Digestor anaerobio alta tasa • Reactor de contacto anaerobio • Filtro anaerobio • UASB • Lecho fluidificado 	Tratamiento secundario	Remueve materiales orgánicos coloidales y disueltos. Emplea métodos mecánicos y biológicos combinados muy diversos

Tabla 2.4. Remoción de nutrientes.

Materia eliminada	Sistema de tratamiento	Proceso de tratamiento	Características
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fósforo ✓ Nitrógeno ✓ Minerales ✓ Metales Pesados 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrificación biológica • Remoción de fósforo • Intercambio iónico • Ósmosis inversa • Electrodiálisis • Adsorción con carbón • Oxidación química • Precipitación química • Volatilización 	Tratamiento terciario	Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones.

Tabla 2.5. Remoción de patógenos.

Materia eliminada	Sistema de tratamiento	Proceso de tratamiento	Características
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Huevos de helminto ✓ Patógenos ✓ Virus ✓ Bacterias ✓ Hongos 	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara de luz UV • Tanque en contacto con cloro 	Desinfección	Remover microorganismos como, bacterias, virus, hongos, parásitos, etc.

2.3.7. Importancia del control y operación de las plantas de tratamiento

Las plantas de tratamiento de la Ciudad de México son operadas de forma manual con la ayuda de los laboratorios de control de proceso instalados en las principales plantas. La calidad del agua es analizada de forma quincenal por el Laboratorio Central de Control de la Calidad, que

además vigila que se cumpla con los criterios y normas que regulan las descargas de agua tratada y su uso.

El sistema de tratamiento de aguas residuales funciona las 24 horas del día los 365 días del año, para lo cual se emplean, operadores, personal de mantenimiento, administrativo y técnico; distribuidos en tres turnos de trabajo y días festivos. Es necesario mantener en operación y condiciones óptimas las plantas de tratamiento de aguas residuales, para obtener una adecuada calidad del agua tratada para disposición y reúso seguro.

El tratamiento de aguas residuales en México enfrenta un gran reto para combatir la contaminación debido a la falta de infraestructura efectiva y eficiente para el tratamiento, así como la reutilización de las aguas tratadas. En ese sentido, en el país existen muchas plantas de tratamiento que no funcionan bien, otras no funcionan, debido a que no se consideraron los costos de operación ni los de construcción de colectores; asimismo, los municipios no cuentan con fondos para cubrirlos. Otras plantas tienen sistemas que contaminan las zonas aledañas con aerosoles o con residuos sólidos o pastosos potencialmente peligrosos. (Durán, 2020 Infografía UNAM).

El 53% del caudal tratado en plantas de tratamiento de aguas residuales en el país se lleva a cabo por procesos aerobios (lodos activados convencionales y aeración extendida) (CONAGUA, 2018) que demandan un alto consumo de energía y producen importante cantidad de lodos, que a su vez también deben tratarse.

Por ello, las autoridades responsables de los tres niveles de gobierno deben desarrollar programas de rehabilitación de plantas abandonadas o fuera de operación, además de llevar a cabo la reconfiguración de aquellas que presenten costos muy elevados, para reducir su consumo de energía y con ello sus costos de operación.

2.4. REÚSO DE AGUA TRATADA

La elevada demanda de agua potable ha motivado el uso de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales como una fuente alternativa de recursos hídricos, disminuyendo el consumo de agua potable en aquellas actividades o procesos económicos que no lo requieran. Este enfoque representa ahorros importantes en las finanzas de los establecimientos, debido a que el costo del metro cúbico de agua residual tratada es menor dependiendo del nivel y tipo de tratamiento, comparándose con el metro cúbico de agua potable, siempre que ésta no sea subsidiada.

Existen actividades en las que no se requiere utilizar agua potable estrictamente, donde el agua tratada puede ser empleada, sin ningún riesgo a la salud o impacto negativo al objetivo del proceso que la utilice, tales como:

- ❖ Riego de áreas verdes (glorietas, camellones, calles, jardines, centros recreativos, parques, campos deportivos, fuentes de ornato, cementerios)
- ❖ Llenado de lagunas, estanques, arroyos artificiales en parques y jardines
- ❖ Carga de cisternas para control de incendios
- ❖ Lavado de automóviles y pisos
- ❖ Descarga de sanitarios y mingitorios
- ❖ Industriales y de servicios (lavado de patios y nave industrial, lavado de flota vehicular, sistemas de enfriamiento, intercambiadores de calor, calderas, cortinas de agua, industria de la construcción, etc.)
- ❖ Recarga de cuerpos de agua superficiales
- ❖ Inyección en mantos freáticos (con estricto control de la calidad de agua infiltrada)

Es importante señalar que el agua tratada debe reunir ciertas características para ser utilizada de acuerdo con la actividad en la que se va a utilizar, determinadas al menos elementalmente por la norma ambiental NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-014-CONAGUA-2003.

2.5. NORMATIVIDAD VIGENTE

En México el objetivo e importancia de las plantas de tratamiento de aguas residuales consiste en la desinfección y la remoción de contaminantes de las aguas para preservar el medio ambiente y propiciar una mayor disponibilidad de este recurso. Para ello se cuenta con normativas nacionales como el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.

De igual importancia se cuenta con las normas oficiales en México para la preservación del medio ambiente, siendo las siguientes:

- ❖ NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
- ❖ NOM-002-SEMARNAT-1996: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.
- ❖ NOM-003-SEMARNAT-1997: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Con el propósito de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.

- ❖ NOM-004-SEMARNAT-2001: Especificaciones y límites máximos de contaminantes permitidos en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final.
- ❖ NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) lleva a cabo muestreos y análisis de las descargas de aguas residuales, de manera periódica o aleatoria, con objeto de verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos para los parámetros señalados en la normatividad mexicana aplicable.

En el año 2021, SEMARNAT ha actualizado la NOM-001 sobre descargas de aguas residuales, tras 25 años de parálisis teniendo como prioridad atender la contaminación de los cuerpos de agua. Los límites técnicos de la norma anterior no solo eran obsoletos, sino que además no correspondían a la problemática actual de la calidad del agua en México, vulnerando con ello el derecho humano de la población de contar con agua de calidad, así como de saneamiento.

Las principales modificaciones de la NOM-001 se refieren a los parámetros de color verdadero, temperatura, demanda química de oxígeno y toxicidad. En lo que se refiere a temperatura, la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece 35 grados como temperatura máxima para las descargas en ríos, bajando cinco grados al parámetro que existía en la norma de 1996.

La norma más estricta llevará a un mejor tratamiento de aguas residuales y posibilitará su reúso, con lo que se generará un ahorro considerable al liberar el agua de primer uso para actividades como limpieza y riego. Además, se disminuye la presión hídrica y la sobreexplotación de los acuíferos, y se previene la contaminación de los cuerpos de agua y las enfermedades diarreicas, lo cual tiene un efecto positivo en el ambiente y en el bienestar de las comunidades.

2.6. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y REÚSO DEL AGUA TRATADA

El sistema de tratamiento y reúso de las aguas residuales a cargo del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) directamente o a través de concesiones, cuenta con 26 plantas de tratamiento, 34 rebombes de agua residual tratada, 4 tanques de agua tratada y 874 kilómetros de tuberías de agua residual tratada. Sin embargo, esta infraestructura no permite atender la demanda de saneamiento de la Ciudad de México, ya que se genera aproximadamente un caudal de 22.51 m³/s de agua residual, de los cuales sólo aproximadamente el 15% (3.34 m³/s) es tratado por las plantas de tratamiento que opera SACMEX.

El reúso de las aguas residuales es un tema que debe atenderse con mayor prioridad en la Ciudad de México. Con las 26 plantas de tratamiento, la mayoría por el proceso de lodos activados, la ciudad lleva a cabo el llenado de canales y lagos en Xochimilco, Tláhuac, Bosque de Chapultepec y San Juan Aragón, así como el riego agrícola metropolitano, de áreas verdes, camellones, parques, jardines, y para uso comercial como servicio sanitario y lavado de autos.

La infraestructura destinada al reúso de agua residual tratada está integrada por 6 PTAR de saneamiento y 20 específicamente para reúso. De acuerdo con el tipo de tratamiento y reúso del agua tratada, las plantas que opera (o concesiona) SACMEX se describen en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Reúso del agua tratada en las diferentes alcaldías de la Ciudad de México (SACMEX, 2020).

Alcaldía	Planta	Capacidad instalada (lps)	Caudal medio anual tratado (lps)	Reúso del agua tratada
Álvaro Obregón	Santa Fe (concesionada)	280	59	Saneamiento de la barranca Tlalpizahuaya y riego de áreas verdes Zedec Santa Fe.
Azcapotzalco	El Rosario	25	15	Riego de áreas verdes en la delegación y llenado del lago del Parque Tezozomoc, suministro de la zona industrial.
Coyoacán	Coyoacán (Concesionada)	250	154	Riego de áreas verdes de la zona Sur - Oriente de las delegaciones Coyoacán, Tlalpan y Álvaro Obregón. Abasto a zonas industriales y Canal Nacional.
Cuauhtémoc	Tlatelolco	22	10	Unidad habitacional Nonoalco Tlatelolco, riego de las Alamedas Central y Santa María de la Rivera, deportivo Plutarco Elías Calles.
Gustavo A. Madero	Acueducto de Guadalupe	110	56	Zona industrial Vallejo riego de áreas verdes.
	San Juan de Aragón	500	167	Llenado del lago y riego de áreas verdes en el Bosque San Juan de Aragón, Alameda Oriente, autolavados y deportivos de la zona.

Iztacalco	Ciudad Deportiva (Concesionada)	230	101	Zonas industriales de Iztapalapa e Iztacalco, deportivos, camellones y áreas verdes.
	Iztacalco	13	13	Riego de áreas en la unidad habitacional INFONAVIT Iztacalco.
Iztapalapa	Cerro de la Estrella	3000	2190	Áreas verdes y zona industrial del Iztapalapa, zona agrícola y chinampera de Tláhuac y Xochimilco, Calzada Ignacio Zaragoza, cierra de Santa Catarina para riego agrícola.
	Santa Martha Acatitla	14	11	Complejos del reclusorio de Sta. Martha Acatitla y áreas verdes.
Magdalena Contreras	Río Magdalena	50	23	Río Magdalena y control de la contaminación.
Miguel Hidalgo	Bosques de las Lomas	25	15	Riego de camellones en las avenidas Palmas y Reforma, comercios en Polanco
	Chapultepec (Concesionada)	160	53	Lago de I y II sección de Chapultepec. rebombeos fuentes Xochipilli, tanque Zaragoza, panteón Dolores, Central Poniente, Paseo de la Reforma, parques México y España, camellones de Polanco.
Milpa Alta	San Pedro Actopan	60	30	Zona agrícola de la delegación Milpa Alta
	Rastro Milpa Alta	15	0	Fuera de servicio
Tláhuac	La Lupita	15	9	Riego agrícola San Juan
	El Llano	250	44	Riego agrícola en los ejidos de San Juan Ixtayopan y San Andrés Mixquic.
	San Andrés Mixquic	30	15	Riego agrícola Santa Cruz, el Triángulo y deportivo Emiliano Aguilar en Tláhuac.
	San Nicolás Tlatelolco	15	10	Zona agrícola de San Nicolás Tetelco.
	San Lorenzo Tezonco	225	59	Llenado de canales en San Gregorio Atlapulco y lago del Parque Ecológico de Tláhuac.
	Abasolo	15	3	Zona de viveros de producción florícola y Río Abasolo.

Tlalpan	Parres	7	7	Abasto a la planta procesadora de asfalto y riego de áreas verdes.
	Pemex Picacho	13	10	Riego de áreas verdes de la unidad habitacional Pemex Picacho.
	San Miguel Xicalco	7.5	5	Riego de áreas verdes y llenado de canales.
Xochimilco	Reclusorio Sur	30	12	Río San Lucas para control de contaminación.
	San Luis Tlaxiltemalco	150	53	Llenado de los canales mantener la navegación en la zona chinampera de San Luis Tlaxialtemalco y San Gregorio Altapulco, vivero Acuexcomatl y deportivos de la zona.

Finalmente, es importante hacer una clasificación de las 26 plantas de tratamiento de la Ciudad de México para identificarlas primero desde el punto de vista de su tamaño y en segundo término por el objetivo que están cumpliendo. De hecho, únicamente en seis plantas se concentra el 85% de la capacidad de tratamiento de la ciudad: Cerro de la Estrella, San Juan de Aragón, Coyoacán, Santa Fe, El Llano y Ciudad Deportiva.

Por su objetivo, se pueden clasificar en dos grupos: el de saneamiento y el de reúso: El grupo de saneamiento se compone de las plantas que deben tratar el caudal de aguas residuales generado por las zonas urbanas aledañas a los cuerpos de agua, ríos, canales, lagunas, chinampas del sur de la ciudad, a fin de evitar su contaminación. Esta acción se inscribe dentro de un programa de saneamiento integral donde el caudal de operación está regulado por el volumen de agua residual que se genera en la cuenca a la que sirve cada planta.

En este programa se integran seis plantas con una capacidad instalada de 59 l/s: Abasolo, Parres, Reclusorio Sur, San Miguel Xicalco, Río Magdalena y Valle Verde, las dos últimas construidas en 2014 y 2016, respectivamente.

El grupo de reúso está integrado por las plantas cuyo caudal de operación se determina en función de la demanda de agua tratada que se presenta durante las diferentes temporadas de año, razón por la cual existen variaciones significativas en el caudal de producción: el máximo se genera durante la temporada de estiaje, y el mínimo en la época de lluvias.

Aquí se integran 20 plantas de tratamiento con una capacidad instalada de 3, 402 l/s: Acueducto de Guadalupe, Bosques de las Lomas, Cerro de la Estrella, Chapultepec, Ciudad Deportiva, Coyoacán, El Rosario, Iztacalco, Pemex Picacho, San Juan de Aragón, Santa Fe, Santa Martha Acatitla, Tlatelolco, El Llano, La Lupita, San Andrés Mixquic, San Lorenzo, San Luis Tlaxialtemalco, San Nicolás Tetelco y San Pedro Atocpan.

La demanda atendida de agua residual tratada en la ciudad se puede clasificar por categorías: la de valor ambiental es de 1,323 l/s; este uso es prioritario, y se destina 38% del total de agua tratada producida disponible. Se utiliza para la conservación de 950 hectáreas de bosques urbanos y lagos recreativos como los de Chapultepec y San Juan de Aragón, entre otros, así como para la preservación de canales de la zona chinampera, y lagos y humedales en la zona lacustre de las delegaciones Tláhuac y Xochimilco.

La segunda categoría con mayor consumo es el riego agrícola, con 1,663 l/s, en la que se utiliza el 48% de la disponibilidad de agua residual tratada; esta demanda se concentra en las 2,215 ha que ocupan las unidades de riego, en su mayoría tecnificadas, dentro de la zona patrimonio de los ejidos productivos de Tláhuac y Xochimilco.

El 14% restante de la demanda (475 l/s) proviene de los usuarios no domésticos (industria, lavado de autos y espacio público de la ciudad como son camellones, parques y jardines).

CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de aguas residuales es necesario para la prevención de la contaminación del agua, y para la protección de la salud pública. Asimismo, constituye uno de los aspectos clave para incrementar la disponibilidad de agua potable, reduciendo el grado de presión sobre los recursos hídricos en el Valle de México, pues a partir del tratamiento eficiente se obtiene agua tratada que puede reutilizarse en distintas actividades donde no se requiera específicamente de agua potable, o incluso infiltrada en los mantos acuíferos.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales en la Ciudad de México son principalmente de tipo biológico, seguidos en algunos casos de fisicoquímicos. Para cada tipo de proceso existen distintas tecnologías con características específicas, las cuales presentan variaciones con respecto a los requerimientos energéticos, demanda de área y grado de remoción de contaminantes. El objetivo de un tren de tratamiento es lograr la remoción de contaminantes para cumplir con los límites máximos permisibles especificados, que para reúso público urbano se presentan en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Las plantas de tratamiento ubicadas en la Ciudad de México presentan algunas carencias como tecnologías obsoletas (salvo la PTAR Chapultepec), o con ciertas deficiencias en el diseño y operación. Por ello, es necesario evaluar el grado de cumplimiento con la normativa de descarga, y en particular con fines de reúso, incorporando las variaciones en la calidad del influente debido a la aportación del agua de lluvia en el sistema de drenaje combinado de la ciudad. El presente trabajo se enfocó en evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes convencionales de cuatro plantas de tratamiento seleccionadas, determinando los parámetros fisicoquímicos principales de calidad del agua en dos temporadas estacionales.

3.2. HIPÓTESIS

La variación estacional en la temporada de lluvias y estiaje que transporta el drenaje combinado de la Ciudad de México influirá en el proceso de tratamiento de aguas residuales, afectando la eficiencia de la planta de tratamiento en la remoción de contaminantes convencionales y la calidad del efluente tratado.

3.3. OBJETIVOS

3.3.1. Objetivo general

Evaluar la calidad del agua residual en influentes y efluentes, de dos temporadas estacionales (lluvias y estiaje) de cuatro diferentes procesos de tratamiento de agua residual en la Ciudad de México.

3.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros fisicoquímicos del agua residual de influentes y efluentes de cuatro plantas de tratamiento de agua residual seleccionadas en la Ciudad de México.
- Determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes convencionales en función de la variación estacional y del tipo de tratamiento aplicado en las cuatro plantas estudiadas.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Se seleccionaron cuatro plantas de tratamiento dentro de la Ciudad de México con diferentes procesos de tratamiento y a las cuales se pudo acceder debido a la pandemia por Covid-19. Las plantas de tratamiento elegidas se muestrearon en dos temporadas estacionales (lluvias y estiaje), comprendiendo el mes de septiembre-octubre del año 2020 y marzo-abril del año 2021, respectivamente. En cada una de las plantas se tomaron tres muestras compuestas por semana (se midieron muestras simples cada 2 horas por 24 horas), para realizar un análisis representativo. Las plantas de tratamiento estudiadas se presentan en la tabla 4.1, todas ellas, con excepción de Ecoducto, bajo responsabilidad de SACMEX.

Tabla 4.1. Tecnologías empleadas de las PTAR seleccionadas en este estudio.

PTAR Estudiada	Tecnología utilizada en la PTAR	Caudal diseño (m ³ /s)	Caudal operación (m ³ /s)	Operación
PTAR Cerro de la Estrella	Lodos activados convencionales	3.00	1.37	SACMEX
PTAR Chapultepec	Reactor biológico con membranas de ultrafiltración	0.16	0.053	Bajo operación de CONAGUA
PTAR Santa Fe	Lodos activados con aireación extendida	0.28	0.050	Concesión por SACMEX
PTAR Ecoducto	Humedales artificiales y reactor biológico	0.0003	0.0003	Sec. de Obras y Servicios Cd. México

Se muestrearon tres puntos en cada PTAR uno al inicio y dos al final de la planta, siendo estos: agua influente, efluente antes de la desinfección (salida sedimentador secundario) y efluente final de la PTAR. En el caso de la planta Ecoducto, el punto intermedio fue el efluente de los cinco biodigestores en serie y el final a la salida de la sección de humedales.

Para la determinación de parámetros fisicoquímicos que se realizaron en este proyecto, se tomaron las muestras de agua influente y efluente final de las PTAR. La muestra de efluente secundario se utilizó para la determinación de antibióticos, fragmentos del virus SARS-CoV-2 y para extraer material genético para la secuenciación. Para el caso de la PTAR Ecoducto se realizó la caracterización completa en el influente, el efluente anaerobio (punto intermedio) y el efluente final (salida del humedal).

4.1.1. Muestreo de las PTAR

PTAR Cerro de la estrella

- ❖ Se definió como punto de muestreo “Influente PTAR” al tanque de recepción de agua de llegada antes de pasar por cribado y cerca del medidor de flujo en el Tren de Tratamiento Sur.
- ❖ Se definió como punto de muestreo “Efluente sedimentador secundario” el sitio después de sedimentadores secundarios en la parte de agua clarificada.
- ❖ Se definió como punto de muestreo “Efluente PTAR” la salida de la desinfección.

El muestreo se tomó en el Tren de Tratamiento Sur, en tres puntos como se muestra en el siguiente esquema:

Punto de muestreo 1. Influyente PTAR

Punto de muestreo 2. Efluente sedimentador secundario

Punto de muestreo 3. Efluente PTAR

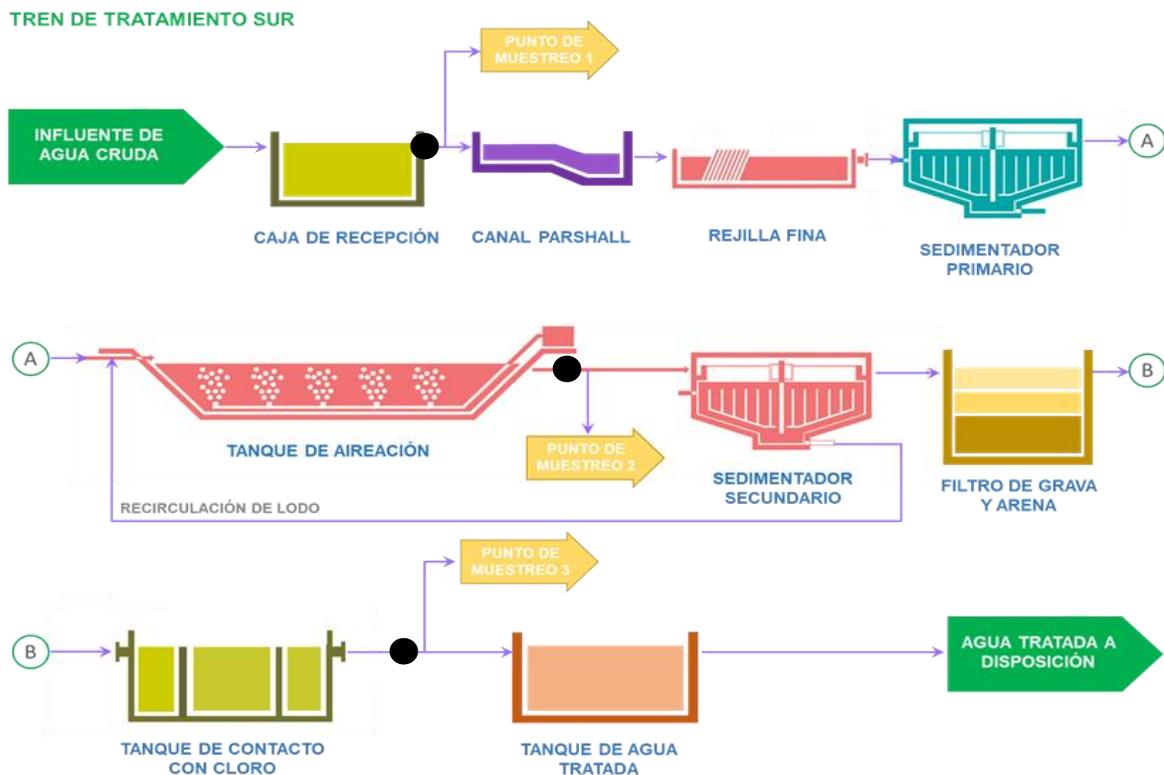


Figura 4.1. Esquema general del tren tratamiento de la PTAR Cerro de la estrella.

PTAR Chapultepec

- ❖ Se definió como “Influente PTAR” el punto de muestreo en el canal de acercamiento de agua de después de pasar por rejillas gruesas y medianas.
- ❖ Se definió como “Efluente reactores” el punto después del tanque de permeado antes de UV.
- ❖ Se definió como “Efluente PTAR” el punto de muestreo fue después de desinfección en el tanque de agua tratada.

El muestreo de la PTAR se tomó en tres puntos como se muestra en el siguiente esquema:

Punto de muestreo 1. Influente PTAR

Punto de muestreo 2. Después de reactores y de la microfiltración

Punto de muestreo 3. Efluente PTAR

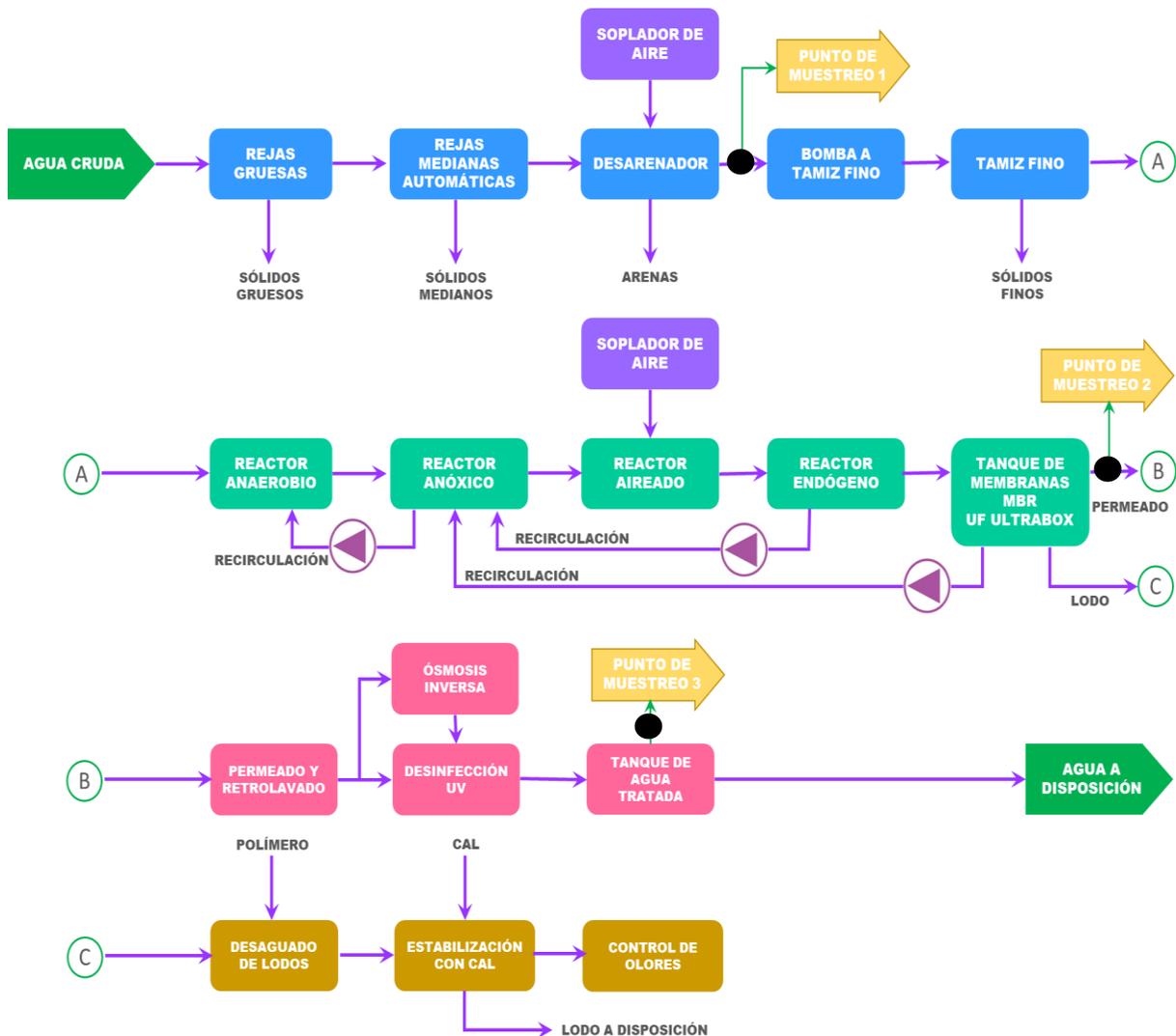


Figura 4.2. Esquema general del tren de tratamiento de la PTAR Chapultepec.

PTAR Santa Fe

- ❖ Se definió como “Influente PTAR” el tanque de recepción de agua de llegada antes de pasar por desarenado.
- ❖ Se definió como “Efluente sedimentador secundario” el sitio después de sedimentadores secundarios y antes de filtros de grava y arena.
- ❖ Se definió como “Efluente PTAR” el punto de muestreo después de desinfección en el tanque de contacto con cloro.

El muestreo se tomó en tres puntos de la PTAR como se muestra en el siguiente esquema:

Punto de muestreo 1. Influyente PTAR

Punto de muestreo 2. Efluente sedimentador secundario

Punto de muestreo 3. Efluente PTAR

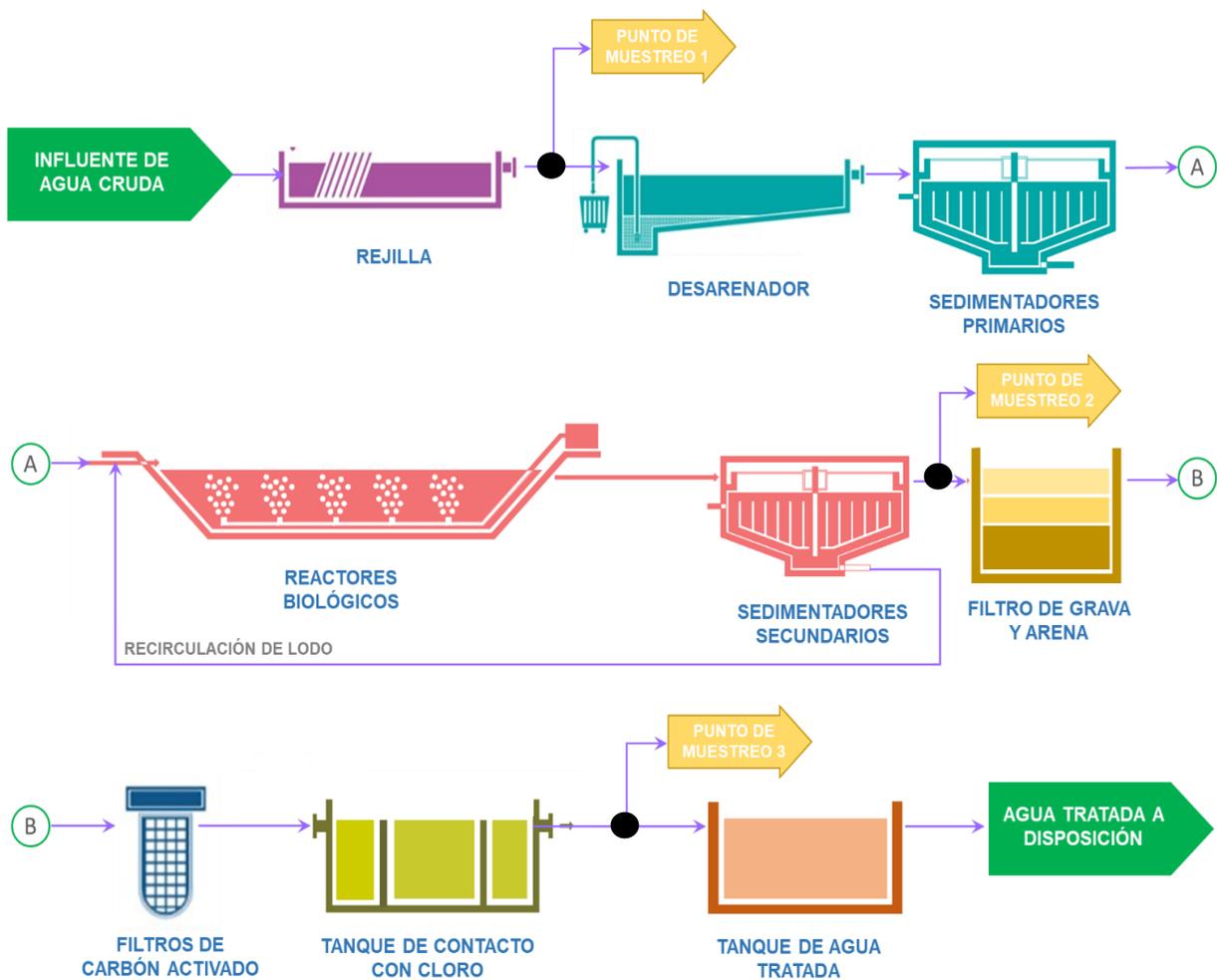


Figura 4.3. Esquema general del tren tratamiento de la PTAR Santa Fe.

PTAR Ecoducto

- ❖ Se definió como “Influente PTAR” el punto de muestreo en el desarenador, en la descarga de la bomba de alimentación.
- ❖ Se definió como “Efluente biodigestores” el sitio antes de entrar a los humedales artificiales.
- ❖ Se definió como “Efluente PTAR (humedales)” al punto de muestreo al final de los humedales artificiales.

El muestreo se tomó en el Tren de Tratamiento Río Becerra, en tres puntos como se muestra en el esquema siguiente:

Punto de muestreo 1. Influyente PTAR

Punto de muestreo 2. Efluente biodigestores

Punto de muestreo 3. Efluente PTAR (humedales)

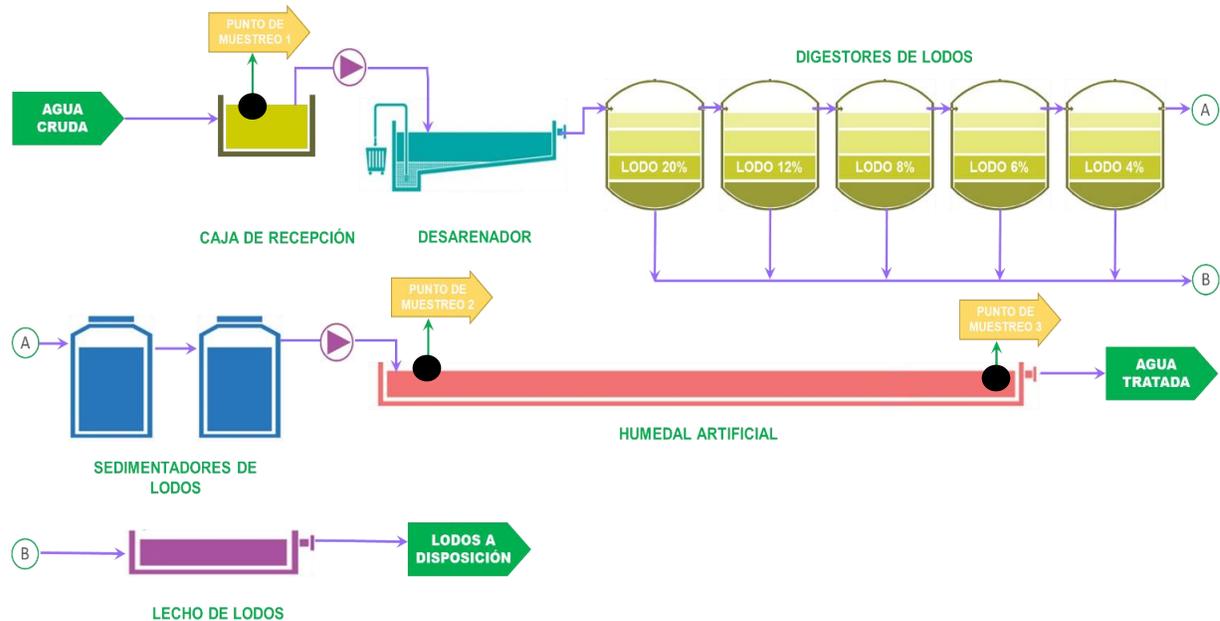


Figura 4.4. Esquema general del tren de tratamiento de la PTAR Ecoducto.

Descripción general de la toma de muestra para cada PTAR

- I. Las muestras simples se tomaron una cada 2 horas durante 24 horas continuas (servicios externos); cada muestra simple tuvo un volumen final de 3 litros. Se realizó el mismo procedimiento en cada uno de los puntos de muestreo.



Figura 4.5. Toma de muestra. a) Agua influente PTAR Santa Fe. b) Agua efluente PTAR Cerro de la estrella.



Figura 4.6. Toma de muestra. a) Agua efluente PTAR Chapultepec. b) Vaciado de muestra simple.

- II. En el caso de la PTAR Ecoducto se tomaron muestras cada 1.5 horas durante 7.5 horas continuas para llegar a 5 muestras simples. Cada muestra simple tuvo un volumen de 3 litros. Esto debido a que la PTAR no operaba las 24 horas, solo en horario diurno.



Figura 4.7. Toma de muestra PTAR Ecoducto. a) Agua influente (desarenador). b) Toma de muestra agua efluente PTAR (humedales).

- III. A cada una de las muestras simples se le midieron los parámetros de conductividad, pH y temperatura al momento de tomar la muestra (servicios externos). Con multiparamétrico marca HANNA HI-9828.



Figura 4.8. Medida de parámetros fisicoquímicos en el sitio, conductividad, temperatura y pH.

- IV. En total se colectaron 12 muestras simples de 3 litros por cada punto de muestreo; teniendo todas las muestras se preparó una muestra compuesta de 24 horas por cada punto, finalmente se envió una muestra compuesta de 18 litros.



Figura 4.9. Preparación de la muestra compuesta de los tres puntos de muestreo.

- V. Adicionalmente, se tomaron 12 muestras de 300 mL en cada uno de los tres puntos mencionados cada 2 horas durante 24 horas continuas a excepción de la PTAR Ecoducto. Para ello se utilizaron botes esterilizados y para el “Efluente PTAR”. Se agregó una dosis de tiosulfato de sodio (PTAR Cerro de la Estrella y Santa Fe) para eliminar el cloro residual y no afectar la muestra destinada a la determinación de coliformes y la extracción de DNA para pruebas basadas en biología molecular.

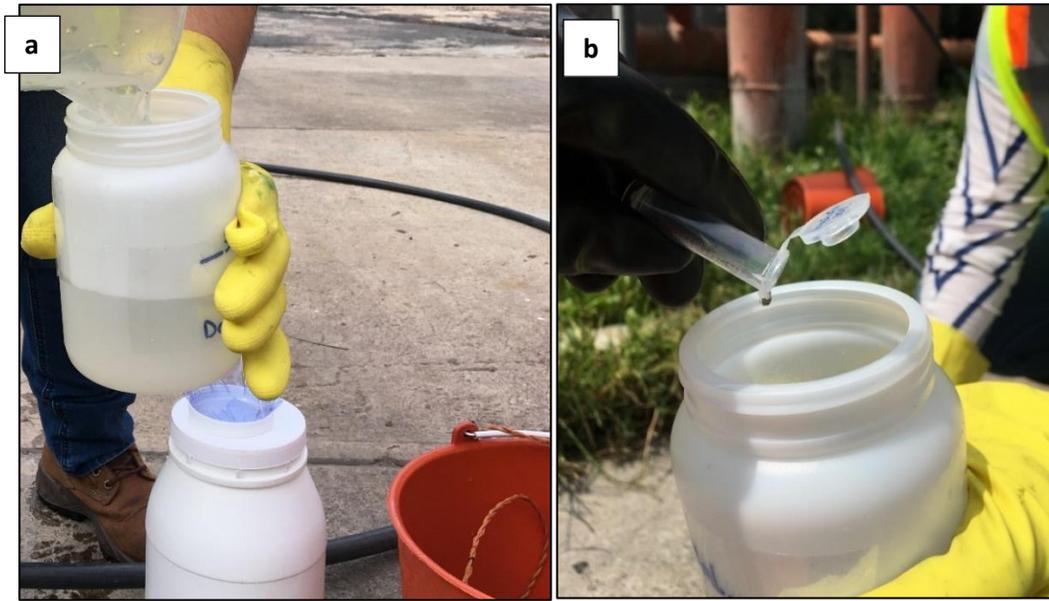


Figura 4.10. a) Toma de muestra simple de 300 mL PTAR Ecoducto. b) Tiosulfato de sodio agregado a las muestras simples de Cerro de la Estrella y Santa Fe.

- VI. También se tomó una muestra simple de lodo del licor mezclado por día de muestreo directamente en el reactor biológico de las PTAR a excepción de la PTAR Ecoducto. Esta muestra fue destinada al análisis de biología molecular.
- VII. En todo momento, desde la toma de muestra hasta la recepción en el laboratorio, todas las muestras se conservaron frías con hielo para su almacenamiento y transporte.

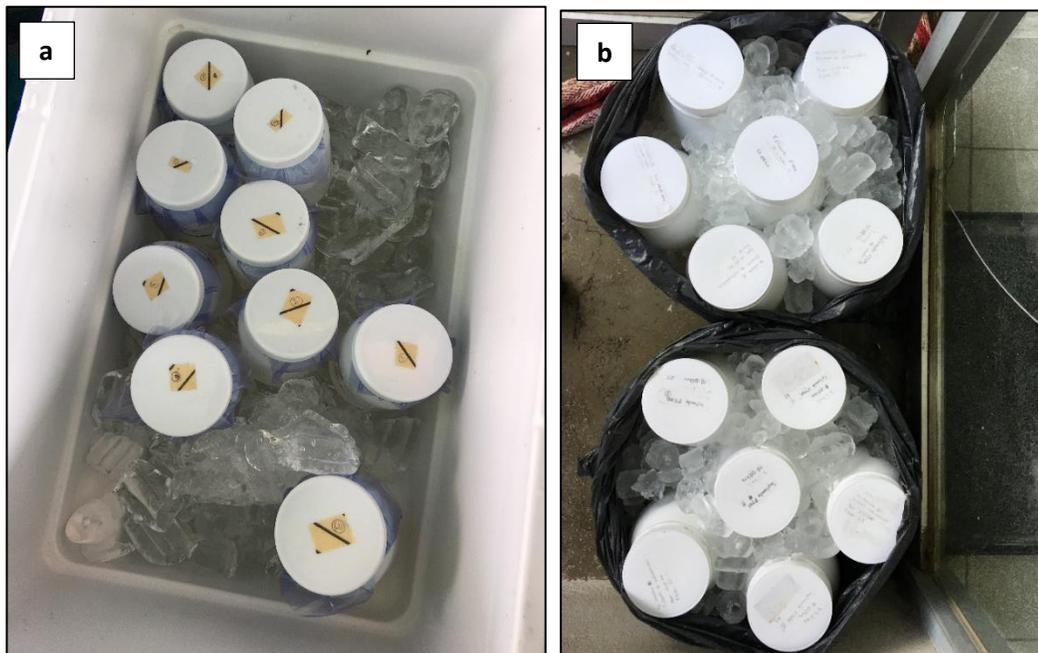


Figura 4.11. Muestras conservadas en frío. a) Muestras simples de 300 mL. b) Muestras simples de 3 L.

VIII. Al finalizar el muestreo, con las muestras ya etiquetadas, la empresa de servicios externos las transportaba al Instituto de Ingeniería de la UNAM para su procesamiento en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA-UNAM), recibiendo las siguientes muestras (por día de muestreo) de cada una de las PTAR:

- **Tres (3) muestras compuestas de 18 L** – Análisis fisicoquímicos y antibióticos
- **Una (1) muestra de lodos de 3 L** – Análisis microbiológicos y de biología molecular
- **Treinta y seis (36) muestras simples de 300 mL** – Análisis microbiológicos y de biología molecular



Figura 4.12. Llegada de muestras al LIA, Instituto de Ingeniería, UNAM.

IX. Al llegar al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) se almacenaban los botes de 18 L con muestra en la cámara fría a 4 °C. Las muestras simples de 300 mL y la muestra de lodo llegaban en hieleras, las cuales se depositaban en el área de microbiología por unos momentos, para realizar la muestra compuesta de los tres puntos de muestreo en condiciones de esterilidad. Posteriormente se hacían los análisis microbiológicos y de biología molecular.

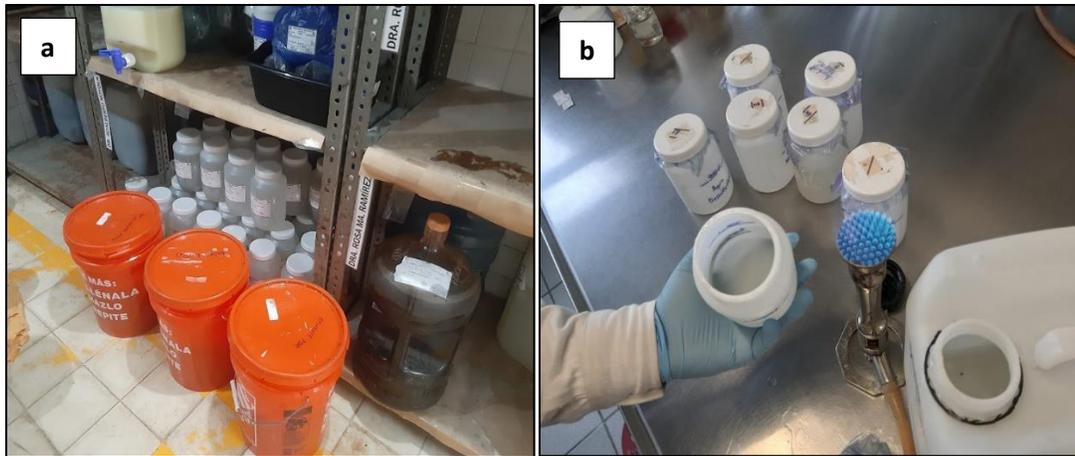


Figura 4.13. a) Almacenamiento de muestras a -4 °C. b) Preparación de muestra compuesta; área microbiológica.

- X. Las muestras llegaban tres veces por semana de cada una de las PTAR y se realizaban los análisis fisicoquímicos al momento de su llegada. Solo se preservaba en frío las muestras para algunos análisis que se hicieron al final de los muestreos como el COT total y soluble, y la determinación de antibióticos. El calendario de la Tabla 4.2. describe las fechas de recepción de muestras en las dos temporadas:

Tabla 4.2. Calendario de las dos temporadas de muestreo.

PTAR	Cerro de la Estrella						Chapultepec						Santa Fe						Ecoducto								
	Lluvias (2020)			Estiaje (2021)			Lluvias (2020)			Estiaje (2021)			Lluvias (2020)			Estiaje (2021)			Lluvias (2020)			Estiaje (2021)					
No de muestra	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Fecha	22-sep	24-sep	27-sep	08-mar	11-mar	12-mar	29-sep	01-oct	04-oct	15-mar	17-mar	19-mar	06-oct	08-oct	11-oct	22-mar	24-mar	26-mar	13-oct	15-oct	17-oct	09-abr	12-abr	14-abr			

4.1.2. Caracterización fisicoquímica del agua residual

A partir de las muestras almacenadas de 18 L que se mantenían refrigeradas a 4 °C, se homogenizaban y se tomaban muestras de 250 mL de agua influente y efluente de la PTAR para realizar los siguientes análisis fisicoquímicos, siguiendo la metodología descrita por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association, 2012)*:

Tabla 4.3. Parámetros fisicoquímicos y equipos empleados para el análisis.

Parámetro	Equipo
Conductividad	Multiparamétrico HANNA HI9829
Temperatura	
pH y alcalinidad	Potenciómetro HANNA HI-2210
Sólidos totales, suspendidos y disueltos en sus tres formas (totales, volátiles y fijos)	Estufa marca Felisa (105 °C) Mufla marca Lindberg (550 °) Balanza analítica marca VOYAGER PRO OHAUS
Nitritos, nitratos y amonio	Espectrofotómetro HACH DR5000 Espectrofotómetro HANNA HI 83099
Nitrógeno orgánico	Por diferencia entre N total y amoniacal
Nitrógeno total Kjeldhal	Digestor HANNA 839800
Fósforo total y ortofosfatos	Espectrofotómetro HACH DR5000
DQO total y soluble	
DBO5 total y soluble	Incubadora Cole-Parmer (20 °C) Multiparamétrico YSI
COT total y soluble	TOC marca SHIMADZU – MODELO TOC-L CSH CARBONO No. H54205000579
Surfactantes aniónicos	Espectrofotómetro HACH DR5000
Coliformes fecales (muestreo en estiaje)	Realizo laboratorio externo
Coliformes totales (muestreo en lluvias)	Incubadora VWR Scientific Inc.
Huevos de helminto	-

Para la planta Ecoducto, también se realizaron los análisis para la muestra del punto intermedio, (efluente después de los biodigestores). Esto se debe a que la planta, como se indica en la Tabla 4.1, cuenta con dos procesos de tratamiento en serie, por lo que se analizaron los efluentes de estos procesos.

En la temporada de lluvias, se realizaron en el LIA-UNAM los análisis de coliformes totales y la DBO5 total y soluble. Para la DBO5, se analizó una sola muestra de agua influente y efluente de las cuatro PTAR. Como se indicará en los resultados, los valores de DBO no fueron del todo confiables.

Sin embargo, en la temporada de estiaje, los análisis de DBO5 y los coliformes fecales (de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997), se realizaron en un laboratorio externo, ya que el acceso al laboratorio LIA-UNAM tenía restricciones de aforo e impedimento para trabajar en fines de semana.

Los surfactantes aniónicos fue el único parámetro que no se analizó siguiendo los *Standard Methods* (American Public Health Association, 2012). Para ello se aplicó el procedimiento propuesto por Jurado *et al.*, (2006), descrito a continuación.

Surfactantes aniónicos

La determinación de surfactantes aniónicos se realizó mediante una curva de calibración preparada de acuerdo con Jurado *et al.* (2006). La metodología para la preparación de la muestras y curva se muestra en la Figura 4.14. Las disoluciones preparadas previamente se describen a continuación:

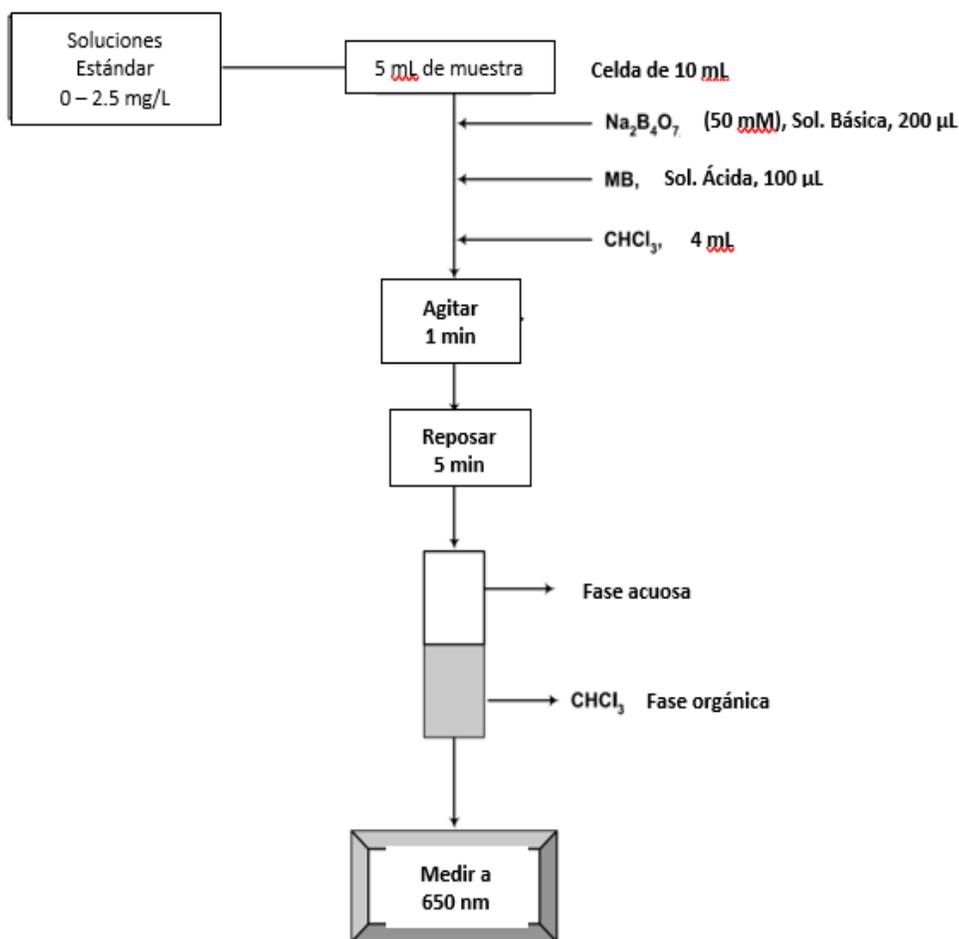


Figura 4.14. Esquema del procedimiento analítico para la determinación de surfactantes aniónicos (Jurado *et al.*, 2006).

1. Se preparó una solución madre de la sal lauril sulfato de sodio (LAS) de concentración (1 g/L), ajustando el pH a 7 con hidróxido de sodio (NaOH).
2. Solución tampón de tetraborato de sodio (50 mmol/L) a pH 10.5: Se disolvieron 19 g de tetraborato de sodio decahidratado en 1 L de agua, el pH de esta solución se ajustó con NaOH a pH 10.5 antes de aforar.

3. Solución de azul de metileno de concentración (3.13 mmol/L) estabilizado a un pH ligeramente ácido: Se disolvió 0.1 g del reactivo azul de metileno en 100 mL en la solución tampón de tetraborato de sodio (10 mmol/L), previamente preparada. Ajustando el pH 5 - 6 aproximadamente con ácido clorhídrico 1 mol/L, se resguardó en un frasco ámbar envuelto con aluminio en la oscuridad.
4. A partir de la solución madre de lauril sulfato de sodio (1 g/L) se hizo una dilución para una disolución de 10 mg/L de concentración de LAS. Después con esta solución se prepararon soluciones estándares con las concentraciones que se muestran en la Tabla 4.4.
5. Se midieron las absorbancias a 650 nm y se obtuvo la curva de calibración en el espectrofotómetro HACH DR 5000.



Figura 4.15. Soluciones estándares (2.5– 0 mg/L) para la determinación de la curva de calibración para surfactantes aniónicos.

Tabla 4.4. Datos de la curva de calibración realizada para la determinación de surfactantes aniónicos.

Estándares (mg/L)	Absorbancia
2.5	1.717
2.0	1.386
1.5	1.087
1.0	0.785
0.5	0.499
0	0

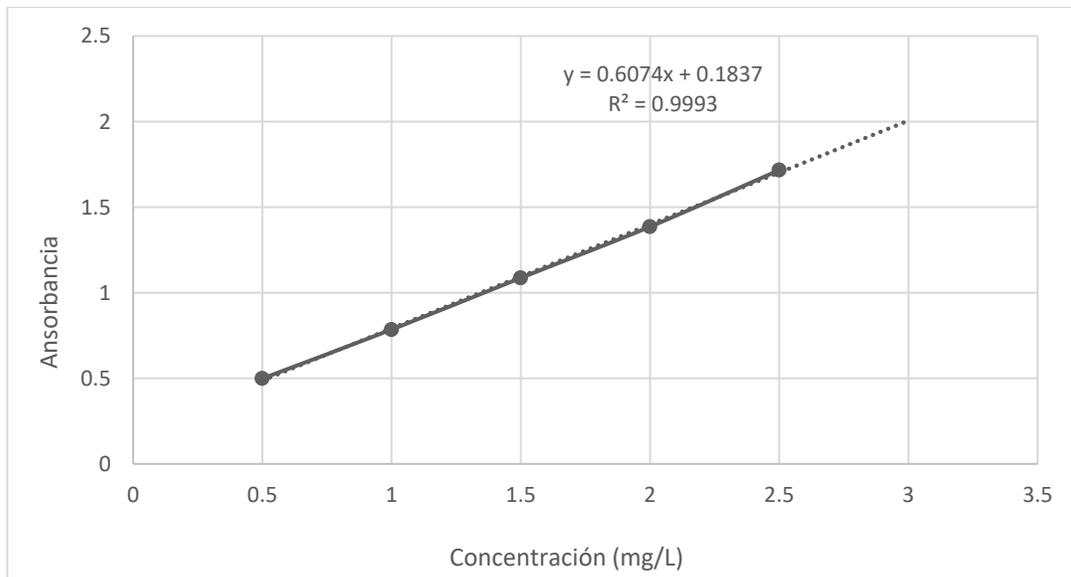


Figura 4.16. Curva de calibración para el surfactante aniónico LAS, mediante el método simplificado de sustancias activas al azul de metileno.

La eficiencia de los tratamientos de cada PTAR se calculó utilizando la siguiente ecuación, tomando los valores medios de los parámetros de agua influente y efluente, obteniendo las remociones de cada parámetro medido.

$$\%R = \frac{[\text{parámetro}]_{\text{influyente}} - [\text{parámetro}]_{\text{efluente}}}{[\text{parámetro}]_{\text{influyente}}} (100)$$

4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO ESTUDIADAS

Las cuatro plantas seleccionadas en la Ciudad de México para los muestreos que se realizaron cuentan con características diferentes y se encuentran localizadas en diferentes alcaldías dentro de la ciudad. Los procesos de tratamiento, sus características y su ubicación se describen a continuación.

4.2.1. PTAR Cerro de la Estrella

La PTAR del Cerro de la Estrella fue construida entre el año 1968 y 1970; se localiza en la alcaldía de Iztapalapa, entre las calles de Naranja y San Lorenzo en la colonia San Juan Jalpa. Es considerada la de mayor tamaño en la ciudad de México y se diseñó para un caudal de 3 000 l/s. Sin embargo, nunca ha operado con el caudal de diseño debido principalmente a las limitantes de capacidad de las líneas que conducen el agua residual hacia la PTAR, provenientes de la planta de bombeo Aculco.

La planta está formada por dos trenes de proceso (Tren de tratamiento Sur y Tren de tratamiento Norte) y cada uno conformado por cuatro módulos, cada uno inicia con un sedimentador primario dividido en dos secciones, a su vez conectados al reactor biológico

aerobio, contando con un cárcamo para la recirculación de lodos por bombeo. Posteriormente, se cuenta con un sedimentador secundario dividido en dos secciones, para terminar en un tanque de cloración y un cárcamo de bombeo desde donde se distribuye el agua a los sitios de aprovechamiento.

Actualmente el agua tratada de la PTAR se utiliza en la zona de reserva ecológica de Xochimilco, Tláhuac y Mixquic. La mayor parte del caudal de esta planta se destina a la conservación ecológica de la zona de Xochimilco, riego de camellones y parques.

La PTAR inició su operación en el año 1971 y en el año 2007 se realizó una reconversión de la planta.

Las principales operaciones unitarias de la PTAR Cerro de la Estrella son los siguientes:

1. Tanque de recepción de agua residual
2. Canales de medición tipo Parshall y conducción
3. Cribado fino (solo para el Tren de Tratamiento Sur)
4. Sedimentación primaria
5. Reactor biológico (reactor aerobio versión lodos activados completamente mezclados con un selector anóxico)
6. Sedimentación secundaria
7. Sistema de filtración
8. Tanque de contacto con cloro
9. Tanque de almacenamiento de agua tratada



Figura 4.17. Vista de la PTAR Cerro de la Estrella (sedimentadores secundarios).

Con la serie de mejoras al sistema de tratamiento en 2007, se trató de establecer un tratamiento de tipo terciario al implementar el sistema de filtración, sin embargo, a la fecha se tienen algunas deficiencias en los componentes de la PTAR que no garantizan este nivel de tratamiento quedando en un sistema secundario con filtración.

4.2.2. PTAR Chapultepec

La construcción de la PTAR Chapultepec se realizó en la zona del bosque, en la parte norte de la segunda sección del Lago de Chapultepec sobre la calle de Pedregal esquina con Ferrocarril de Cuernavaca, Colonia Lomas de Chapultepec en la alcaldía Miguel Hidalgo. La planta ocupa el sitio de la primera instalación de tratamiento de aguas residuales de la Cd de México, en 1956. La nueva planta inició su operación en el año de 2018 teniendo una tecnología de punta única en México para aguas urbanas (reactor biológico con membranas: MBR). Inicialmente se planteó para un caudal de diseño de 170 l/s, pero su máximo flujo en la actualidad es de 85 l/s.

La PTAR está compuesta por varias estructuras, entre ellas el tamiz fino, cuatro fases de tratamiento del reactor (reactor anaerobio, reactor anóxico, reactor aireado y reactor endógeno) y un tanque con los módulos de membranas. Se hace alimentación de aire para los diversos procesos que lo requieren a través de cinco equipos de sopladores.



Figura 4.18. Vista de la PTAR Chapultepec.

Después del tanque de membranas, el agua se conduce al tanque de permeado, para después pasar al sistema de UV para su desinfección. De esta operación, el agua desinfectada pasa al tanque de almacenamiento de agua tratada donde un juego de bombas la conducen a los sitios de aprovechamiento.

La planta cuenta además con un sistema de osmosis inversa para la opción de que una parte del agua tratada pueda inyectarse al acuífero por medio de un pozo en la misma área de la Planta. El agua tratada se distribuye principalmente en el Lago de I y II sección de Chapultepec, rebombos a fuentes Xochipilli, panteón Dolores, Central Poniente, Paseo de la Reforma, parques México y España.

Para llevar a cabo el proceso se tiene instalada en la PTAR las siguientes operaciones unitarias:

1. Canal de llegada
2. Rejillas gruesas manuales
3. Rejillas medianas automáticas
4. Desarenador longitudinal con extracción de arenas automático
5. Control de olores en zona de pretratamiento
6. Bombas de alimentación a tamiz fino
7. Tamiz fino
8. Reactor anaerobio
9. Reactor anóxico
10. Reactor aireado
11. Reactor endógeno
12. Sopladores para reactores
13. Tanque de membranas UF (ultrafiltración)
14. Sopladores para tanque de membranas
15. Tanque de permeado
16. Bombas de tanque de permeado
17. Sistema UV
18. Tanque de agua tratada
19. Bombas de agua tratada
20. Sistema de osmosis inversa
21. Bombas de alimentación a centrífugas
22. Centrífugas para desaguado de lodos
23. Sistema para adición de cal para estabilización del lodo
24. Planta de polímero
25. Sistema de dosificación de polímero
26. Sistema de preparación de cal
27. Sistema de dosificación de cal

4.2.3. PTAR Santa Fe

La planta de Santa Fe se construyó en el año de 1994. Se ubica en la parte alta del pueblo del mismo nombre en la delegación Álvaro Obregón de la colonia Jalalpa en la calle de Encinal que constituye el acceso a la misma. Cuenta con un sistema de tratamiento convencional con base en lodos activados completamente mezclados para un caudal de diseño de 200 l/s, considerando la incorporación de un tren nuevo. El agua residual proviene fundamentalmente del desarrollo corporativo Santa Fe a través de un colector para operar con un caudal máximo de 140 l/s.

El agua tratada se distribuye a diversos usuarios incluyendo las áreas verdes de una gran parte de Santa Fe y con usuarios particulares como bancos que contratan con la empresa concesionada para su operación.

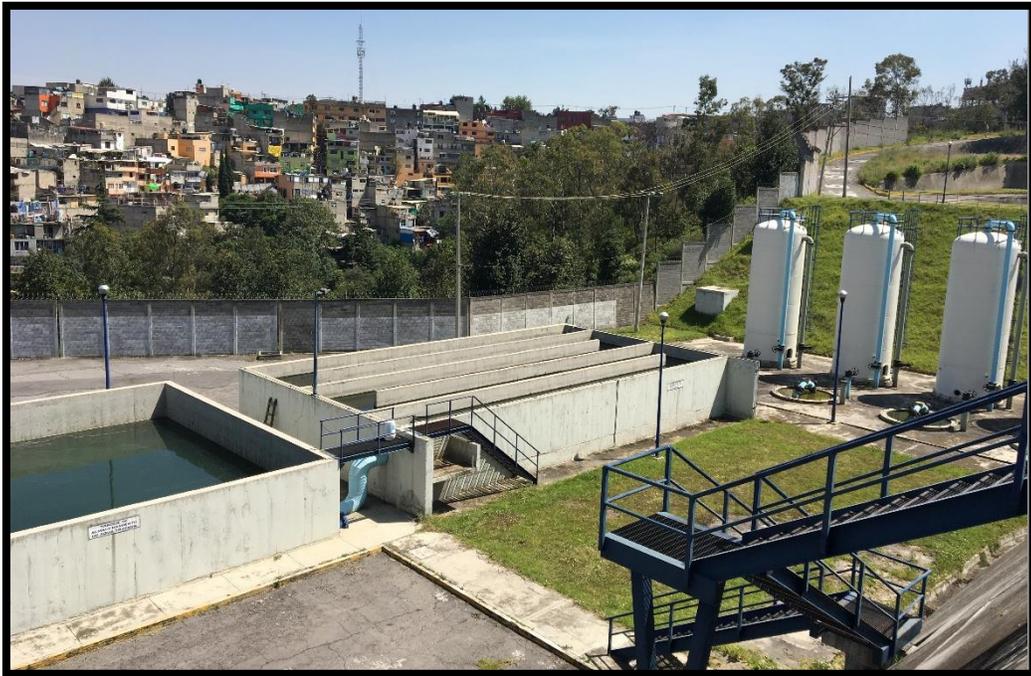


Figura 4.19. Vista de la PTAR Santa Fe.

Para llevar a cabo el proceso se tiene instalada en la PTAR las siguientes operaciones unitarias:

1. Caja de recolección con sistema de pretratamiento con rejillas gruesas manuales y rejillas medianas automatizadas
2. Desarenador con extracción automática de arenas; el desarenador es marca Dorr Oliver
3. Medidor de flujo en tubería de alimentación a sedimentadores primarios
4. Módulos de sedimentación primaria de forma rectangular
5. Mezcladores hiperboloides en sedimentadores primarios

6. Reactores biológicos con aireación a base de difusores. Tipo lodos activados completamente mezclados
7. Sopladores para la aireación a los reactores biológicos
8. Módulos de sedimentación secundaria, de tipo circular
9. Filtros de arena con cambio de empaquetamiento en 2017
10. Cárcamo de agua filtrada
11. Cárcamo de retrolavado de filtros de arena y de carbón activado.
12. Filtros de carbón activado
13. Tanque de contacto de cloro
14. Tanque de almacenamiento de agua tratada
15. Cárcamo de agua tratada
16. Cárcamo de recuperación
17. Caseta de cloración
18. Medidor de flujo en tubería de agua tratada
19. Cárcamo de lodos
20. Espesador de lodos
21. Digestor de lodos (aerobios)
22. Sopladores para digestor de lodos
23. Filtros prensa tipo banda
24. Planta de preparación de polímero
25. Banda transportadora, tornillo sinfín y tolva de lodos

Se considera un tratamiento terciario con desinfección al tomar en cuenta el sistema de filtración con carbón activado. Sin embargo, actualmente 5 de estos filtros están fuera de operación, limitando la planta a un tratamiento secundario convencional con tratamiento biológico a base de lodos activados.

4.2.4. PTAR Ecoducto

La PTAR Ecoducto Río de la Piedad que además cuenta un parque para recreación, se encuentra ubicada sobre Viaducto Pdte. Miguel Alemán Valdés, Escandón I Sección, Benito Juárez, 03810 Ciudad de México, CDMX. Funciona como depurador de aguas residuales que son extraídas del Río Becerra y/o Río Tacubaya. A través de un sistema de biodigestores y humedales artificiales, se tratan aproximadamente 30 000 litros diarios que son utilizados para riego de las áreas verdes del parque lineal Ecoducto.

La Planta inició operación en 2017. Se compone de 2 trenes de tratamiento idénticos, en paralelo, unidos al término del primer tramo de humedal. EL agua se bombea de los colectores que transportan el agua del Río Tacubaya y del Río Becerra.



Figura 4.20. Vista de la PTAR Ecoducto (tanques desarenadores en primer plano).

Para llevar a cabo el proceso se tiene instalada en la PTAR las siguientes operaciones unitarias (para los dos trenes):

1. Bomba de alimentación a planta, 2 unidades para cada tren
2. Desarenador longitudinal con filtro flotante de lirio acuático para control de olores, uno por tren
3. Sección de clarificación de agua, en esta operación pueden unirse los dos trenes, 2 unidades
4. Bomba de alimentación a biodigestores, 2 unidades para cada tren
5. Biodigestores operando en serie, 5 unidades para cada tren
6. Tanque de ayuda, 2 unidades para cada tren
7. Bomba de tanque de ayuda, 2 unidades para cada tren
8. Humedales de canal (acueducto humedal), una unidad por tren
9. Sección empacada con piedra, actualmente se dejó el crecimiento de plantas y funciona como humedal, 1 unidad
10. Sección de desinfección biológica, con fitoplancton y zooplancton, ahora está llena de vegetación, 1 unidad
11. Humedal heterogéneo, 1 unidad
12. Humedal acuático flotante con plantas nativas, 1 unidad
13. Lecho de secado de lodos, 2 unidades, una por tren

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE BITÁCORAS DE SACMEX (DATOS HISTÓRICOS)

Durante un periodo de diez años (2010 – 2020) SACMEX ha muestreado y obtenido valores de caracterización de agua residual influente y efluente durante las temporadas de lluvia y estiaje, con base en muestras puntuales de las plantas de tratamiento que se encuentran ubicadas en la Ciudad de México, incluyendo las estudiadas en este proyecto (Cerro de la Estrella, Chapultepec y Santa Fe). La PTAR Chapultepec, tiene datos de caracterización del año 2010 – 2018 con el proceso de lodos activados original y resultados después de la rehabilitación de la planta con el proceso de membranas de filtración. Para la planta Ecoducto, al no estar bajo la responsabilidad de SACMEX, y debido a que la planta inicio su operación en 2017, no se cuenta con esta información histórica.

Los datos proporcionados por SACMEX se sometieron a una evaluación estadística, que de acuerdo con (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) es de gran importancia para el estudio de las plantas de tratamiento de aguas residuales, para determinar las variaciones estadísticas de los caudales y su carga contaminante. A partir del número de datos, mínimo y máximo, se hicieron los cálculos correspondientes para obtener los valores de media aritmética (promedio), mediana, moda, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, coeficiente de asimetría, curtosis.

Los datos del porcentaje de probabilidad de ocurrencia fueron calculados con la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, Inc., 2003):

$$\% = \left(\frac{m}{n + 1} \right) 100$$

Donde:

m: número de la posición ascendente de un dato ordenado de menor a mayor.

n: número de datos

Con base en los resultados de la evaluación estadística histórica de la caracterización de las PTAR estudiadas (excepto Ecoducto) se calcularon datos promedio, desviación estándar, probabilidad de ocurrencia al 85% y el número de datos, los cuales se presentan en las siguientes tablas, para cada planta de tratamiento analizada y en las dos estaciones de muestreo (secas y lluvias).

PTAR Cerro de la Estrella

Tabla 4.5. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
Parámetro		Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar	
PTAR: Cerro de la Estrella	pH	7.45	7.63	77	0.18	
	Alc-T	mgCaCO ₃ /L	295.37	395.93	77	97.07
	SST	mg/L	135.51	184.48	76	47.26
	SSV	mg/L	95.29	130.39	76	33.88
	DQO T	mg/L	345.64	456.06	77	106.59
	DQO S	mg/L	146.95	196.12	72	47.46
	DBO T	mg/L	158.31	189.84	80	30.43
	DBO S	mg/L	69.85	85.59	75	15.19
	N-ORG	mg/L	11.41	13.80	37	2.30
	N-NH ₄ ⁺	mg/L	25.28	29.57	54	4.14
	PT	mg/L	4.82	6.56	64	1.68
	Colif-f	NMP/100mL	1.04E+07	1.78E+07	75	7.09E+06

Tabla 4.6. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
Parámetro		Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar	
PTAR: Cerro de la Estrella	pH	-	7.40	7.66	65	0.25
	Alc-T	mgCaCO ₃ /L	252.97	328.33	65	72.74
	SST	mg/L	80.94	123.79	61	41.36
	SSV	mg/L	59.73	91.71	61	30.87
	DQO T	mg/L	238.36	393.39	58	149.64
	DQO S	mg/L	105.13	183.01	50	75.17
	DBO T	mg/L	104.82	148.39	68	42.05
	DBO S	mg/L	47.63	69.74	61	21.34
	N-ORG	mg/L	8.39	12.59	30	4.06
	N-NH ₄ ⁺	mg/L	17.49	24.35	42	6.61
	PT	mg/L	3.35	5.32	55	1.90
	Colif-f	NMP/100mL	1.42E+07	2.84E+07	60	1.37E+07

Tabla 4.7. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA								
		Parámetro	Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar		
PTAR: Cerro de la Estrella		pH	-	7.53	7.76	76	0.22	
		Alc-T	mgCaCO ₃ /L	176.83	207.55	76	29.64	
		SST	mg/L	13.33	20.64	75	7.06	
		SSV	mg/L	12.19	17.84	75	5.46	
		DQO T	mg/L	52.55	148.95	76	93.05	
		DQO S	mg/L	26.28	46.97	71	19.98	
		DBO T	mg/L	5.44	8.47	79	2.92	
	Punto: Efluente / Estiaje		DBO S	mg/L	34.09	133.21	72	95.67
			N-ORG	mg/L	2.55	3.32	36	0.73
			N-NH ₄ ⁺	mg/L	6.07	11.09	57	4.85
		PT	mg/L	2.83	4.47	62	1.58	
		Colif-f	NMP/100mL	7.08E+03	2.64E+04	64	1.87E+04	

Tabla 4.8. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA								
		Parámetro	Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar		
PTAR: Cerro de la Estrella		pH	-	7.55	7.79	67	0.24	
		Alc T	mgCaCO ₃ /L	167.16	233.86	67	64.39	
		SST	mg/L	13.81	19.52	63	5.51	
		SSV	mg/L	12.56	16.87	63	4.15	
		DQO T	mg/L	37.98	62.75	60	23.92	
		DQO S	mg/L	21.72	41.48	52	19.07	
		DBO T	mg/L	5.27	9.52	70	4.10	
	Punto: Efluente / Lluvias		DBO S	mg/L	23.86	50.06	61	25.29
			N-ORG	mg/L	2.19	3.21	31	0.98
			N-NH ₄ ⁺	mg/L	4.56	8.78	41	4.07
		PT	mg/L	2.82	5.80	58	2.88	
		Colif-f	NMP/100mL	5.67E+03	2.07E+04	58	1.45E+04	

PTAR Chapultepec

Tabla 4.9. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
PTAR: Chapultepec	Parámetro		Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar
	Punto: Influente / Estiaje	pH	-	7.41	7.60	88
Alc-T		mgCaCO ₃ /L	239.35	278.03	88	37.33
SST		mg/L	248.32	346.54	86	94.80
SSV		mg/L	195.55	288.33	86	89.55
DQO T		mg/L	595.07	819.69	89	216.82
DQO S		mg/L	212.63	289.79	84	74.48
DBO T		mg/L	301.75	372.46	90	68.24
DBO S		mg/L	101.50	120.92	85	18.75
N-ORG		mg/L	17.51	22.44	40	4.76
N-NH ₄ ⁺		mg/L	35.08	43.21	55	7.85
PT		mg/L	4.64	7.35	74	2.62
Colif-f		NMP/100mL	2.14E+07	3.08E+07	85	9.07E+06

Tabla 4.10. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
PTAR: Chapultepec	Parámetro		Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar
	Punto: Influente / Lluvias	pH	-	7.44	7.64	98
Alc-T		mgCaCO ₃ /L	212.36	245.72	98	32.21
SST		mg/L	213.77	316.16	92	98.83
SSV		mg/L	163.65	253.11	92	86.36
DQO T		mg/L	467.33	629.11	90	156.16
DQO S		mg/L	191.20	269.92	80	75.99
DBO T		mg/L	238.67	295.20	100	54.57
DBO S		mg/L	92.13	162.55	93	67.98
N-ORG		mg/L	17.09	21.42	37	4.18
N-NH ₄ ⁺		mg/L	29.67	38.58	59	8.61
PT		mg/L	4.94	7.91	88	2.87
Colif-f		NMP/100mL	2.46E+07	3.63E+07	91	1.13E+07

Tabla 4.11. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
		Parámetro	Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar
PTAR: Chapultepec		pH -	7.26	7.59	83	0.31
		Alc-T mgCaCO ₃ /L	93.36	135.35	83	40.53
		SST mg/L	13.80	19.73	81	5.72
		SSV mg/L	14.08	22.59	81	8.21
		DQO T mg/L	38.35	63.27	85	24.05
		DQO S mg/L	20.13	35.27	80	14.60
Punto: Efluente / Estiaje		DBO T mg/L	4.71	8.37	85	3.53
		DBO S mg/L	1.88	2.88	80	0.96
		N-ORG mg/L	1.93	2.69	37	0.74
		N-NH ₄ ⁺ mg/L	4.09	9.11	50	4.85
		PT mg/L	2.83	4.41	69	1.52
		Colif-f NMP/100mL	7.83E+03	2.40E+04	73	1.56E+04

Tabla 4.12. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
		Parámetro	Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar
PTAR: Chapultepec		pH -	7.06	7.50	97	0.42
		Alc-T mgCaCO ₃ /L	62.51	101.71	97	37.83
		SST mg/L	12.28	17.48	91	5.02
		SSV mg/L	11.59	16.60	91	4.83
		DQO T mg/L	31.44	52.81	89	20.63
		DQO S mg/L	21.09	37.63	80	15.97
Punto: Efluente / Lluvias		DBO T mg/L	4.51	6.87	100	2.28
		DBO S mg/L	1.82	3.01	92	1.14
		N-ORG mg/L	1.97	3.01	37	1.00
		N-NH ₄ ⁺ mg/L	2.83	6.33	58	3.38
		PT mg/L	3.53	6.78	87	3.14
		Colif-f NMP/100mL	5.59E+03	1.22E+04	84	6.39E+03

PTAR Santa Fe

Tabla 4.13. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
PTAR: Santa Fe	Parámetro		Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar
	Punto: Influente / Estiaje	pH	-	7.41	7.67	60
Alc-T		mgCaCO ₃ /L	275.45	325.41	60	48.23
SST		mg/L	391.92	594.18	58	195.23
SSV		mg/L	311.50	485.10	58	167.57
DQO T		mg/L	710.43	966.49	62	247.17
DQO S		mg/L	219.67	360.50	58	135.93
DBO T		mg/L	362.60	523.83	62	155.63
DBO S		mg/L	52.04	79.40	58	26.41
N-ORG		mg/L	33.08	45.16	30	11.66
N-NH ₄ ⁺		mg/L	48.99	64.46	35	14.93
PT		mg/L	6.43	10.81	47	4.22
Colif-f		NMP/100mL	2.26E+07	3.56E+07	56	1.25E+07

Tabla 4.14. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua influente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA						
PTAR: Santa Fe	Parámetro		Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar
	Punto: Influente / Lluvias	pH	-	7.43	7.66	76
Alc-T		mgCaCO ₃ /L	234.85	310.78	76	73.30
SST		mg/L	279.87	466.33	70	179.98
SSV		mg/L	218.36	377.07	70	153.19
DQO T		mg/L	522.88	984.49	68	445.57
DQO S		mg/L	177.78	337.26	59	153.93
DBO T		mg/L	238.20	366.82	78	124.15
DBO S		mg/L	43.07	64.22	69	20.42
N-ORG		mg/L	23.14	36.49	37	12.89
N-NH ₄ ⁺		mg/L	34.00	47.69	51	13.22
PT		mg/L	6.08	12.01	68	5.72
Colif-f		NMP/100mL	2.83E+07	4.63E+07	70	1.74E+07

Tabla 4.15. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/estiaje) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA								
		Parámetro	Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar		
PTAR: Santa Fe		pH	-	6.72	7.10	62	0.37	
		Alc-T	mgCaCO ₃ /L	36.88	68.72	62	30.73	
		SST	mg/L	14.04	16.86	60	2.72	
		SSV	mg/L	12.84	16.72	60	3.75	
		DQO T	mg/L	60.27	108.81	64	46.85	
		DQO S	mg/L	27.51	50.63	60	22.32	
		DBO T	mg/L	5.02	7.88	64	2.76	
	Punto: Efluente / Estiaje		DBO S	mg/L	2.59	3.88	60	1.24
			N-ORG	mg/L	2.38	3.42	28	1.00
			N-NH ₄ ⁺	mg/L	2.75	7.24	32	4.34
		PT	mg/L	5.89	8.19	49	2.22	
		Colif-f	NMP/100mL	5.90E+03	1.66E+04	53	1.03E+04	

Tabla 4.16. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos históricos (agua efluente/lluvias) con base en los datos proporcionados por SACMEX.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA								
		Parámetro	Promedio	Probabilidad de ocurrencia al 85% de confianza	Número de datos	Desviación estándar		
PTAR: Santa Fe		pH	-	6.73	7.21	80	0.46	
		Alc-T	mgCaCO ₃ /L	41.91	88.85	80	45.31	
		SST	mg/L	12.93	17.04	74	3.96	
		SSV	mg/L	12.44	16.40	74	3.82	
		DQO T	mg/L	34.88	50.30	73	14.89	
		DQO S	mg/L	23.26	37.10	63	13.36	
		DBO T	mg/L	4.64	7.23	83	2.50	
	Punto: Efluente / Lluvias		DBO S	mg/L	2.71	7.22	75	4.35
			N-ORG	mg/L	2.02	2.72	35	0.68
			N-NH ₄ ⁺	mg/L	3.52	8.49	53	4.79
		PT	mg/L	4.75	7.41	73	2.57	
		Colif-f	NMP/100mL	5.27E+03	1.91E+04	65	1.34E+04	

Como se mencionó anteriormente, Ecoducto es una planta que inicio su operación recientemente en el año 2017, y que no está bajo la responsabilidad de SACMEX, por lo que no se obtuvieron datos de años anteriores asociados a está.

Sin embargo, SACMEX realizo un único muestreo donde se obtuvieron datos de muestras simples de los tres puntos que se tomaron en este proyecto. No se realizó un análisis estadístico, ya que solo eran datos puntuales, como se presentan en la Tabla 4.16.

Tabla 4.17. Datos obtenidos por SACMEX de muestras simples (un solo muestreo).

DATOS SACMEX					
	Parámetro		Influyente	Efluente B.	Efluente H.
PTAR: Ecoducto	pH	-	7.51	7.63	8
	Alc-T	mgCaCO ₃ /L	233.00	300.00	218
	SST	mg/L	47.00	<1.5	16
	SSV	mg/L	47.00	<1.5	16
	DQO T	mg/L	-	-	-
Datos: Muestra simple	DQO S	mg/L	-	-	-
	DBO T	mg/L	98.00	60.00	3
	DBO S	mg/L	68.00	33.00	1
	N-ORG	mg/L			
	N-NH ₄ ⁺	mg/L	27.56	34.57	<1.5
	PT	mg/L	-	-	-
	Colif-f	NMP/100mL	3.60E+07	2.50E+06	2200

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de agua influente y efluente de las PTAR seleccionadas, se determinaron durante tres días por semana como se muestran en el calendario de muestreo (Tabla 4.2.), tanto en temporada de lluvias como de estiaje. En cada una de las PTAR se calcularon los promedios de los duplicados que se hacían para cada uno de los parámetros por muestra, obteniendo tres datos por semana, finalmente estos tres datos también se promediaron para obtener un valor final para agua influente y efluente de cada parámetro medido, y se realizaron tablas resumen de estos datos, que en los siguientes subcapítulos se presentan y se describen.

Además, para los parámetros de calidad del agua más relevantes de cada PTAR en temporada de lluvias y estiaje se realizó un análisis estadístico mediante pruebas de ANOVA, Tukey-Kramer y t de Student con el programa JMP®: Statistical Software. Los resultados del software estadístico se presentan en los siguientes subcapítulos.

Los análisis para determinar la DBO₅ en la temporada de lluvias, se realizaron en una sola muestra de las tres obtenidas en la semana de muestreo de las PTAR. Sin embargo, debido a una complicación en la técnica referente a la medición de oxígeno disuelto, los resultados no fueron coherentes al relacionarlos con los obtenidos en la DQO. Para la temporada de estiaje, se envió igualmente una muestra de agua influente y efluente por semana de muestreo, a un laboratorio privado (servicios externos) para su análisis; los resultados obtenidos son los que se reportan en las tablas.

De igual forma, en la temporada de lluvias se realizaron los análisis para la determinación de coliformes totales en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería. En la temporada de estiaje, los análisis se realizaron en el mismo laboratorio privado, y de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 y los límites máximos permisibles, se cuantificaron coliformes fecales.

Los datos de COT T* y COT s* marcados con asterisco se calcularon a partir de los valores de DQO al aplicar la relación DQO/COT de 3. Los valores obtenidos en la caracterización en el laboratorio mediante la técnica del *Standard Methods* (American Public Health Association, 2012) no se reportaron debido a que no se incluyeron los sólidos sedimentados (la muestra no se homogeneizó) en cada una de ellas, en el momento de hacer la inyección al equipo TOC.

Finalmente, se compararon los datos obtenidos en este proyecto, con los datos promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos por SACMEX durante el periodo de diez años para la temporada de estiaje y lluvias, en agua residual (influyente) y agua residual tratada (efluente).

5.1. INFLUENCIA DE LLUVIA Y ESTIAJE EN LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DE LA CD. DE MÉXICO

Uno de los objetivos de este proyecto es evaluar la influencia de la estacionalidad en la calidad del agua residual municipal de la CDMX. En ese sentido, igualmente importante es determinar qué plantas de tratamiento presentan una diferencia significativa en la caracterización del agua residual influente en función de la temporada de lluvias y estiaje.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los parámetros fisicoquímicos determinados en las muestras de agua residual del muestreo realizado.

La Tabla 5.1 presenta los valores promedio de cada uno de los parámetros determinados en el influente de las PTAR estudiadas, para la temporada de lluvias, así como un promedio general y su desviación estándar.

La Tabla 5.2 presenta el mismo tipo de información, pero para la temporada de estiaje. Es importante señalar que para calcular los datos del promedio general en la temporada de lluvias y estiaje de las Tablas 5.1 y 5.2, se utilizaron los 12 datos obtenidos por temporada (caracterización de tres muestras por semana, de cada una de las plantas).

Tabla 5.1. Valores promedio de agua influente en temporada de lluvias de cuatro PTAR estudiadas, en la Cd. de México y su respectivo promedio general.

PTAR		CERRO DE LA ESTRELLA	CHAPULTEPEC	SANTA FE	ECODUCTO	PROMEDIO GENERAL	
Parámetro		Lluvias Influyente	Lluvias Influyente	Lluvias Influyente	Lluvias Influyente	Promedio n = 12	Desviación estándar (±)
pH		6.89	7.37	7.43	7.52	7.30	0.06
Alc	mgCaCO ₃ /L	158.67	80.33	113.00	163.67	128.92	40.06
DQOt	mg/L	133.33	214.33	295.83	308.00	237.88	91.16
DQOs	mg/L	79.67	113.50	137.00	155.50	121.42	36.99
DBO5t	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DBO5s	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND
COTT*	mg/L	44.44	71.56	98.67	102.67	79.33	29.12
COTs*	mg/L	26.67	37.89	45.67	36.91	36.79	11.77
ST	mg/L	548.89	415.67	475.44	532.65	493.16	78.93
STV	mg/L	154.89	175.89	195.11	229.17	188.77	41.33
STF	mg/L	394	239.78	280.33	303.48	304.40	64.12
SST	mg/L	38.33	67.33	94.33	93.21	73.30	29.79
SSV	mg/L	32.67	62.00	82.33	79.73	64.18	26.15
SSF	mg/L	5.66	5.33	12	13.48	9.12	3.93
SDT	mg/L	510.56	348.33	3.81E+02	439.44	419.86	74.08
SDV	mg/L	122.22	113.89	112.78	149.44	124.58	22.99
SDF	mg/L	388.33	234.44	268.33	290.00	295.27	64.35
Surfactantes	mg/L	3.39	3.72	4.17	5.08	4.09	0.80
PT	mg/L	2.63	1.17	2.47	3.77	2.51	1.16
PO ₄ ³⁻	mg/L	8.10	3.53	7.47	11.55	7.66	3.56
NTK	mg/L	23.17	23.67	44.67	56.83	37.08	16.36
N-Norg	mg/L	17.16	15.05	9.44	22.32	15.99	6.70
N-NH ₄ ⁺	mg/L	6.00	8.62	35.22	34.51	21.09	15.20
N-NO ₃ ⁻	mg/L	2.91	1.52	3.43	1.42	2.32	1.04
N-NO ₂ ⁻	mg/L	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ColifFecales	NMP/100mL	ND	ND	ND	ND	ND	ND
ColifTotales	NMP/100mL	1.16E+07	1.12E+07	1.12E+07	3.77E+07	1.79E+07	2.83E+07
Huevos de Helminto	HH/L	1.20	0.6	0.66	1.06	0.88	0.26
Conductividad	µs/cm	849.42	568.36	696.19	725.13	709.78	125.22
Temperatura	°C	19.55	20.48	19.44	22.35	20.46	1.31

ND: No determinado

Tabla 5.2. Valores promedio de agua influente en temporada de estiaje de cuatro PTAR estudiadas, en la Cd. de México y su respectivo promedio general.

PTAR		CERRO DE LA ESTRELLA	CHAPULTEPEC	SANTA FE	ECODUCTO	PROMEDIO GENERAL	
Parámetro		Estiaje Influyente	Estiaje Influyente	Estiaje Influyente	Estiaje Influyente	Promedio n = 12	Desviación estándar (±)
pH		6.95	6.96	7.17	7.06	7.04	0.06
Alc	mgCaCO ₃ /L	185.83	93.33	145.00	158.33	145.63	37.32
DQOt	mg/L	295.33	376.83	428.00	396.17	374.08	88.72
DQOs	mg/L	150.67	191.83	163.50	206.00	178.00	30.11
DBO5t	mg/L	131.56	345.85	224.64	283.60	246.41	78.96
DBO5s	mg/L	45.57	127.49	85.44	56.70	70.46	42.01
COTT*	mg/L	98.44	125.61	142.67	132.06	120.96	34.54
COTs*	mg/L	65.17	63.94	54.50	68.67	63.07	12.70
ST	mg/L	655.33	474.67	553.33	583.80	566.78	93.01
STV	mg/L	268.00	232.67	292.00	291.13	270.95	50.48
STF	mg/L	387.33	242	261.33	292.67	295.83	65.21
SST	mg/L	113.33	125.33	186.00	168.47	148.28	53.62
SSV	mg/L	102.00	107.33	162.67	139.80	127.95	43.54
SSF	mg/L	11.33	18	23.33	28.67	20.33	14.04
SDT	mg/L	542.00	349.33	367.33	415.33	418.50	85.25
SDV	mg/L	166.00	125.33	129.33	151.33	143.00	28.88
SDF	mg/L	376.00	224.00	238.00	264.00	275.50	66.81
Surfactantes	mg/L	4.47	5.70	3.44	3.75	4.34	1.48
PT	mg/L	3.98	2.88	4.25	4.37	3.87	0.82
PO ₄ ³⁻	mg/L	12.22	8.92	12.97	13.37	11.98	2.53
NTK	mg/L	38.50	32.83	52.00	52.33	43.92	10.83
N-Norg	mg/L	11.38	7.16	21.65	15.05	13.81	6.99
N-NH ₄ ⁺	mg/L	27.12	25.67	30.35	37.28	30.11	6.76
N-NO ₃ ⁻	mg/L	2.70	2.63	3.59	3.17	2.95	0.91
N-NO ₂ ⁻	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
ColifFecales	NMP/100mL	5.83E+06	4.53E+06	3.38E+07	1.93E+06	1.15E+07	1.57E+07
ColifTotales	NMP/100mL	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Huevos de Helminto	HH/L	1.67	0.80	0.93	2.50	1.48	0.70
Conductividad	µs/cm	947.27	541.33	808.94	813.07	772.70	152.91
Temperatura	°C	19.76	20.68	19.91	22.46	20.70	1.16

ND: No Determinado

Las Tablas 5.1 y 5.2 tienen asociadas las Figuras 5.1 y 5.2, donde se graficaron los parámetros seleccionados de las tablas correspondientes, siendo (pH, DQO total y soluble, sólidos totales y suspendidos (T, V y F), nitrógeno total Kjeldahl, nitrógeno amoniacal y temperatura) algunos de los más importantes para evaluar la calidad del agua residual. Con el fin de comparar ambas temporadas de muestreo, se graficó un punto (promedio) con su respectiva desviación estándar, las barras de error en cada uno de los puntos promedio, representan ± su desviación estándar.

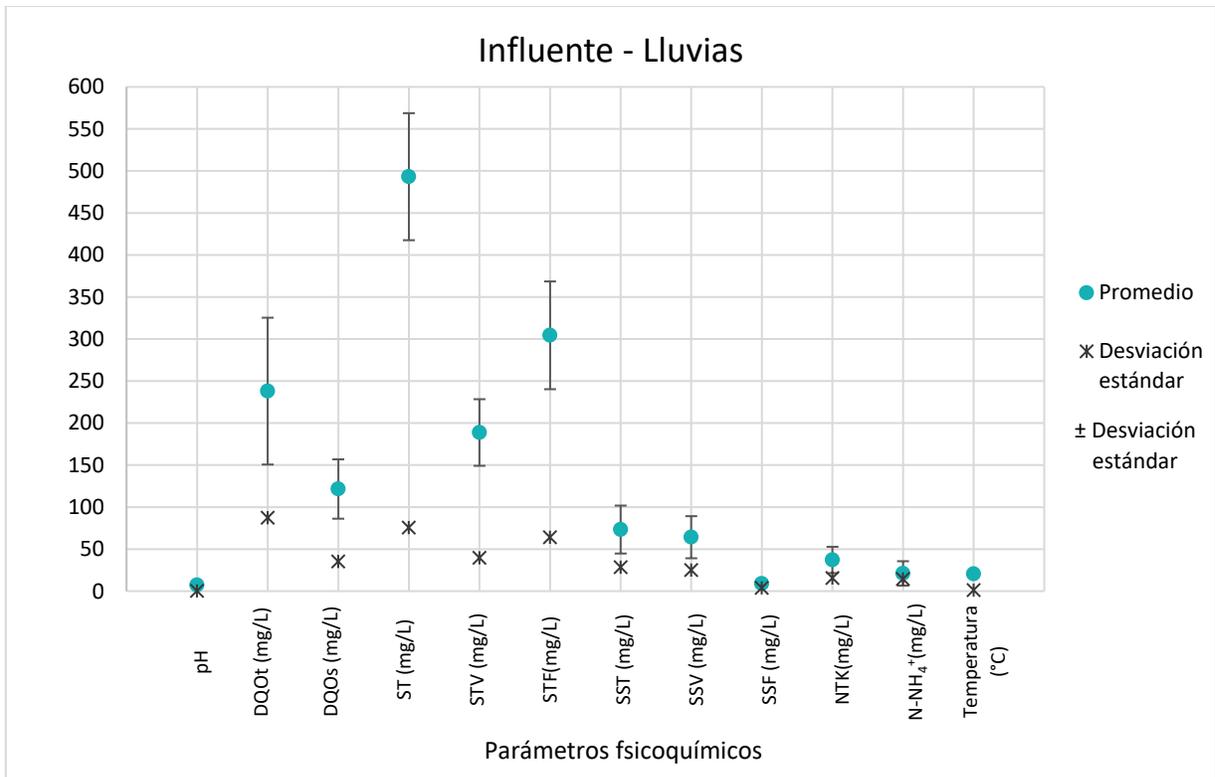


Figura 5.1. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de lluvias de la CDMX.

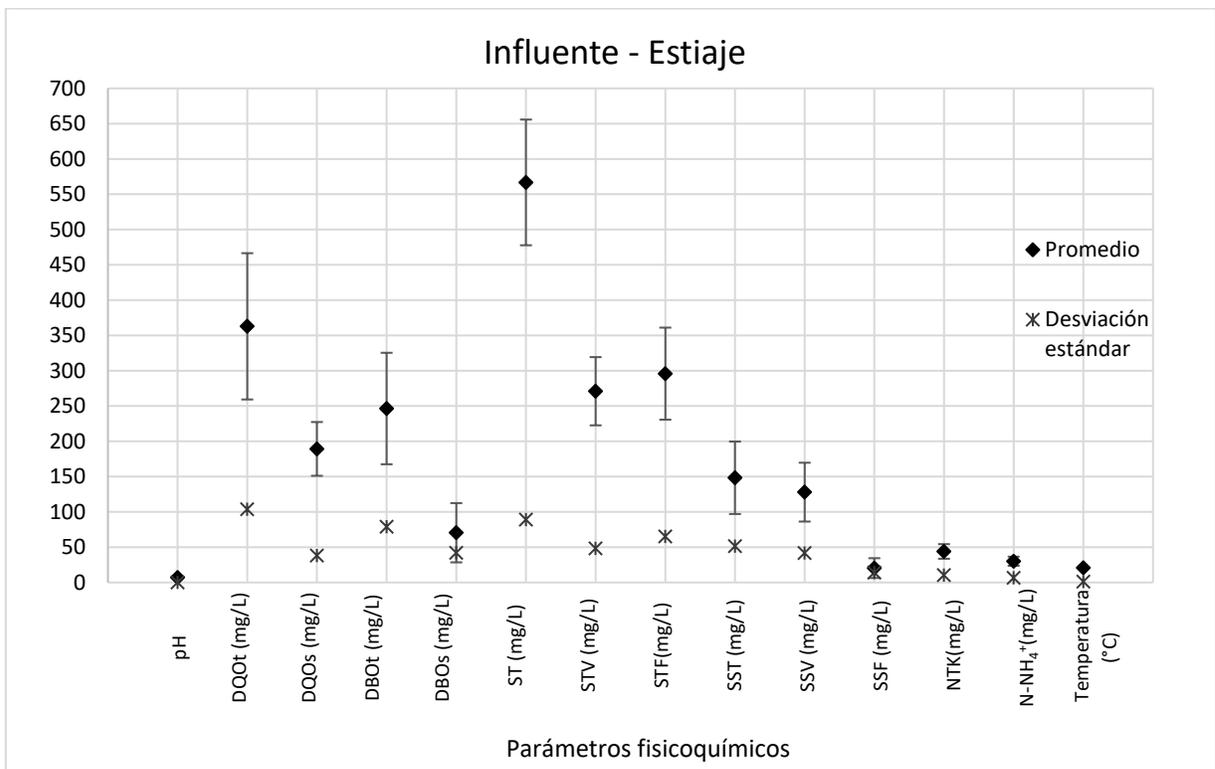


Figura 5.2. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de lluvias de la CDMX.

Para verificar si hay o no diferencias significativas en la temporada de lluvias y estiaje del influente, se realizó una prueba de ANOVA y t de Student con el promedio de los 12 datos obtenidos de las PTAR a cada uno de los parámetros seleccionados como relevantes.

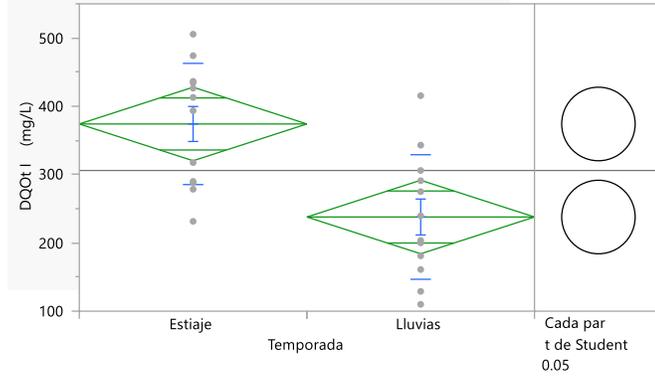
También para determinar qué plantas de tratamiento presentan una diferencia significativa para ambas temporadas, en el subcapítulo 5.3 se realiza una prueba de Tukey-Kramer con los promedios de tres datos obtenidos por semana en cada PTAR para la temporada de lluvias y estiaje.

Los resultados de la prueba de t de Student y ANOVA se presentan en la tabla siguiente:

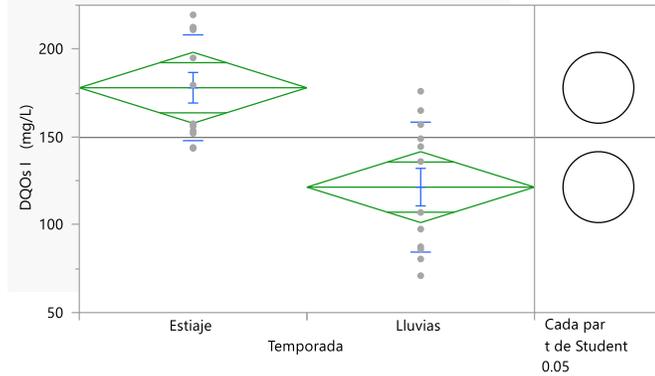
Tabla 5.3. Comparación del agua influente en temporada de lluvias y estiaje con los datos de las cuatro PTAR evaluadas, mediante el análisis estadístico t de Student.

Parámetro	Figura de la comparación de Lluvias-estiaje
<p>pH: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.</p>	
<p>Temperatura: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro no hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.</p>	

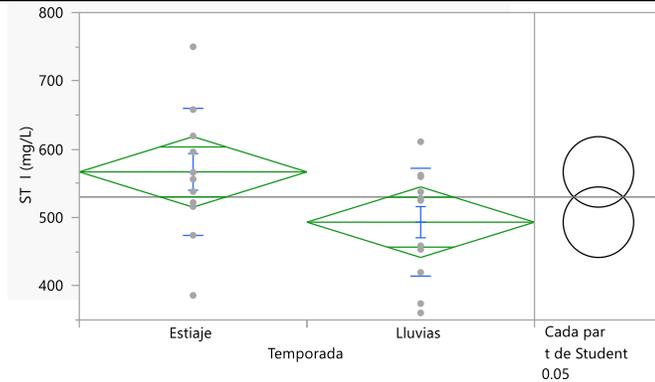
DQOt: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



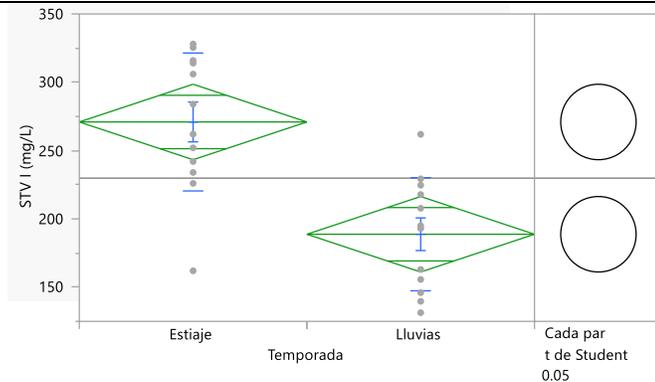
DQOs: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



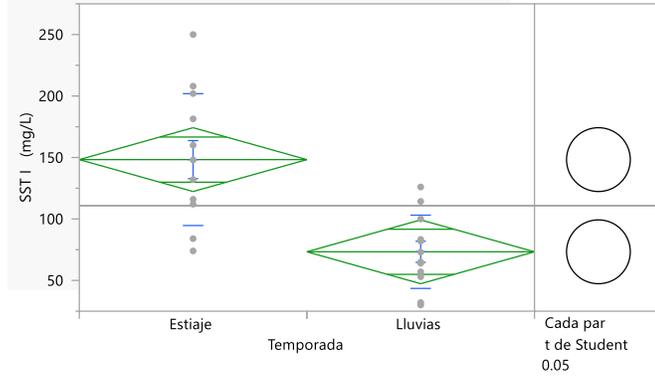
ST: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro no hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



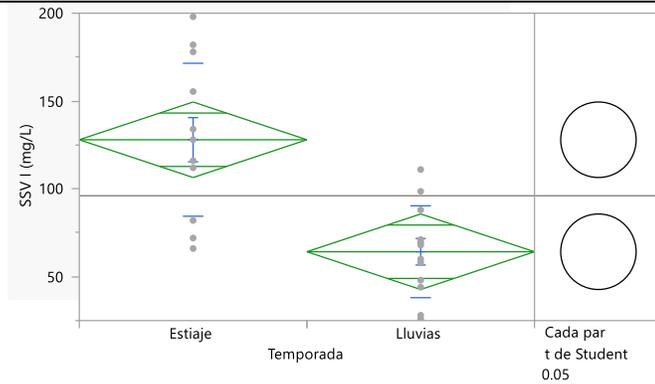
STV: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



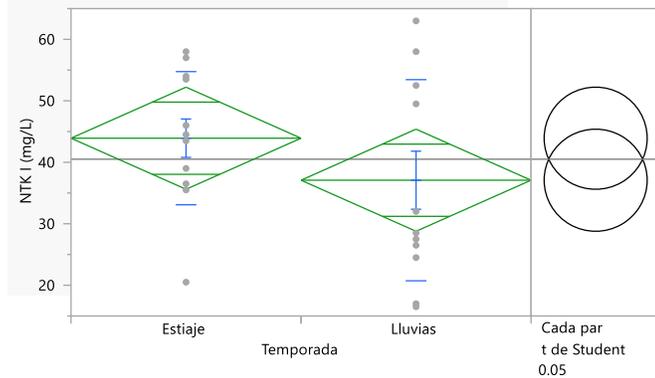
SST: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



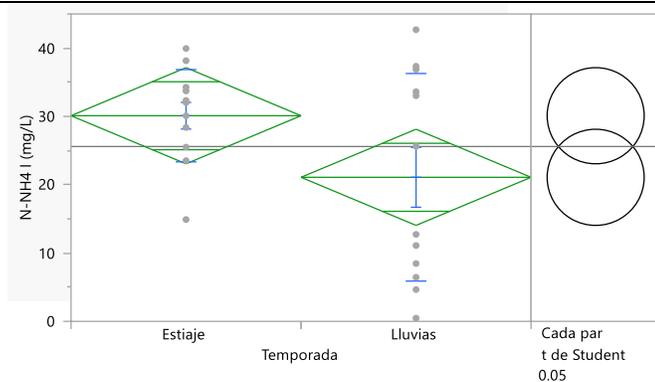
SSV: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



NTK: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro no hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



N-NH₄⁺: De acuerdo con la siguiente figura, en este parámetro no hay diferencia significativa en los promedios de ambas temporadas.



Al comparar los resultados obtenidos en la época de lluvias y estiaje del agua residual, de acuerdo con su promedio, desviación estándar mostradas en la Figura 5.1 y 5.2, y la prueba de t de Student de la Tabla 5.3, los parámetros pH, DQO total y soluble, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos totales y volátiles, muestran diferencias significativas en ambas temporadas.

Por ejemplo, en las concentraciones obtenidas en lluvias y estiaje (valores promedio desviación estándar, respectivamente) de la DQOt (237.88 ± 91.16 vs 374.08 ± 88.72) y los sólidos totales ST (493.16 ± 78.93 vs 566.78 ± 93.01), es claro el aumento de carga contaminante en la temporada de estiaje en el valor promedio.

Uno de los parámetros que no mostró diferencias significativas fue la temperatura en el agua residual a pesar de que en la temporada de estiaje la temperatura aumenta en la CDMX. Sin embargo, los cambios estacionales en la calidad del agua que conducen las redes de drenaje se deben a que en ella se vierten las aguas residuales urbanas y las resultantes de la precipitación pluvial. El agua de lluvia, a diferencia del agua residual propiamente, tiene una menor carga contaminante. Al mezclarse con el agua residual urbana, se produce una dilución y un incremento del caudal, por lo que la carga contaminante, expresada como flujo másico (masa/tiempo) se incrementa, provocando diversos problemas en las plantas de tratamiento. Lo más frecuente es impedir que un caudal mayor al definido como pico ingrese a las instalaciones, mediante un desvío al medio receptor o bien al drenaje, como es el caso en la Cd de México.

La Tabla 5.4, presenta los valores promedio generales de cada temporada indicados en las Tablas 5.1 y 5.2 para temporada de lluvia y estiaje, así como el promedio de ambas temporadas. El promedio general de la Tabla 5.4 representa la calidad de agua residual generada en la Cd. de México, determinada en las dos temporadas de muestreo. El promedio general se calculó con los 24 datos generados en lluvias y estiaje, de cada PTAR estudiada.

Tabla 5.4. Caracterización representativa del agua residual de la Cd. de México, datos promedio generales de la temporada de lluvias y estiaje, con un número de datos igual a (n = 24).

PTAR		Agua residual de la CDMX					
Parámetro		Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Promedio General n = 24	Desviación Estándar (±)
pH		7.30	0.06	7.04	0.06	7.17	0.25
Alc	mgCaCO ₃ /L	128.92	40.06	145.63	37.32	137.27	39.61
DQOt	mg/L	237.88	91.16	374.08	88.72	305.98	114.38
DQOs	mg/L	121.42	36.99	178.00	30.11	149.71	49.93
DBO5t	mg/L	ND	ND	246.41	78.96	246.41	78.96
DBO5s	mg/L	ND	ND	70.46	42.01	70.46	42.01
COTT*	mg/L	79.33	29.12	120.96	34.54	100.15	38.13
COTs*	mg/L	36.79	11.77	63.07	12.70	51.79	16.64
ST	mg/L	493.16	78.93	566.78	93.01	529.97	90.42
STV	mg/L	188.77	41.33	270.95	50.48	229.86	60.35
STF	mg/L	304.40	64.12	295.83	65.21	300.12	64.81
SST	mg/L	73.30	29.79	148.28	53.62	110.79	55.95
SSV	mg/L	64.18	26.15	127.95	43.54	96.07	46.89
SSF	mg/L	9.04	3.93	20.33	14.04	14.73	11.74
SDT	mg/L	419.86	74.08	418.50	85.25	419.18	79.86
SDV	mg/L	124.58	22.99	143.00	28.88	133.79	27.68
SDF	mg/L	295.27	64.35	275.50	66.81	285.39	66.33
Surfactantes	mg/L	4.09	0.80	4.34	1.48	4.22	1.19
PT	mg/L	2.51	1.16	3.87	0.82	3.19	1.21
PO ₄ ³⁻	mg/L	7.66	3.56	11.98	2.53	9.82	3.77
NTK	mg/L	37.08	16.36	43.92	10.83	40.50	13.72
N-Norg	mg/L	15.99	6.70	13.81	6.99	14.90	6.93
N-NH ₄ ⁺	mg/L	21.09	15.20	30.11	6.76	25.60	12.13
N-NO ₃ ⁻	mg/L	2.32	1.04	2.95	0.91	2.70	1.01
N-NO ₂ ⁻	mg/L	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Colifecales	NMP/100mL	ND	ND	1.15E+07	1.57E+07	1.15E+07	1.57E+07
ColifTotales	NMP/100mL	1.79E+07	2.83E+07	ND	ND	2.71E+07	2.83E+07
Huevos de Helminto	HH/L	0.88	0.26	1.48	0.70	1.18	0.61
Conductividad	µs/cm	709.78	125.22	772.70	152.91	741.24	143.25
Temperatura	°C	20.46	1.31	20.70	1.16	20.58	1.19

ND: No determinado

La Figura 5.3, presenta los datos promedio de parámetros seleccionados, con sus respectivas barras de ± desviación estándar.

En el subcapítulo siguiente se realiza una comparación de los datos obtenidos históricos, realizados por SACMEX y los que se obtuvieron en el proyecto, para identificar la variabilidad con los resultados obtenidos.

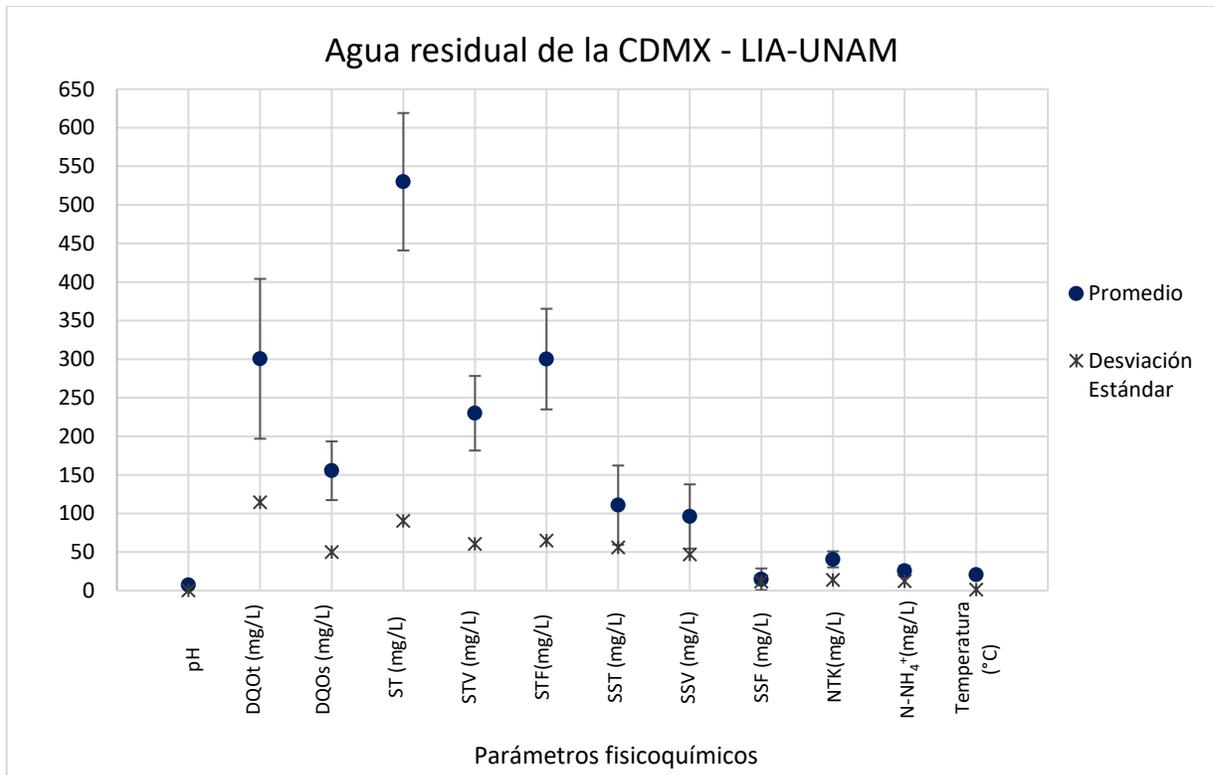


Figura 5.3. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua residual producida en la CDMX, conjuntando época de lluvias y estiaje.

5.2. COMPARACIÓN DE LOS VALORES HISTÓRICOS DEL AGUA RESIDUAL DE LA CD. DE MÉXICO CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos históricos que se reportan en las tablas siguientes se tomaron del Capítulo 4.3. Se consideraron los valores promedio de cada parámetro para cada una de las tres plantas de tratamiento analizadas, y se calculó el promedio y su desviación estándar con esos tres datos (Tablas 5.5 para lluvias y Tabla 5.6 para estiaje). Es necesario recordar que los valores históricos proporcionados por SACMEX se midieron en un periodo de diez años, del año 2010 – 2020, comprendiendo los meses de noviembre – abril como temporada de estiaje y mayo– octubre para la temporada de lluvias.

Tabla 5.5. Valores históricos promedio obtenidos por SACMEX, de agua influente en temporada de lluvias de tres PTAR estudiadas y su respectivo promedio general.

PTAR		CERRO DE LA ESTRELLA	CHAPULTEPEC	SANTA FE	PROMEDIO GENERAL	
Parámetro		Lluvias Influyente	Lluvias Influyente	Lluvias Influyente	Promedio n = 3	Desviación estándar (±)
pH		7.40	7.44	7.43	7.42	0.02
Alc	mgCaCO ₃ /L	252.97	212.36	234.85	233.39	16.61
DQOt	mg/L	238.36	467.33	522.88	409.52	123.14
DQOs	mg/L	105.13	191.20	177.78	158.04	37.81
DBO5t	mg/L	104.82	238.67	238.20	193.90	62.99
DBO5s	mg/L	47.63	92.13	43.07	60.94	22.13
SST	mg/L	80.94	213.77	279.87	191.53	82.72
SSV	mg/L	59.73	163.65	218.36	147.25	65.79
PT	mg/L	3.35	4.94	6.08	4.79	1.12
N-Norg	mg/L	8.39	17.09	23.14	16.21	6.05
N-NH ₄ ⁺	mg/L	17.49	29.67	34.00	27.05	6.99
Colif-f	NMP/100mL	1.42E+07	2.46E+07	2.83E+07	2.24E+07	5.97E+06

Tabla 5.6. Valores históricos promedio obtenidos por SACMEX, de agua influente en temporada de estiaje de tres PTAR estudiadas y su respectivo promedio general.

PTAR		CERRO DE LA ESTRELLA	CHAPULTEPEC	SANTA FE	PROMEDIO GENERAL	
Parámetro		Estiaje Influyente	Estiaje Influyente	Estiaje Influyente	Promedio n = 3	Desviación estándar (±)
pH		7.45	7.41	7.41	7.42	0.02
Alc	mgCaCO ₃ /L	295.37	239.35	275.45	270.06	23.19
DQOt	mg/L	345.64	595.07	710.43	550.38	152.24
DQOs	mg/L	146.95	212.63	219.67	193.08	32.75
DBO5t	mg/L	158.31	301.75	362.60	274.22	85.64
DBO5s	mg/L	69.85	101.50	52.04	74.46	20.45
SST	mg/L	135.51	248.32	391.92	258.58	104.93
SSV	mg/L	95.29	195.55	311.50	200.78	88.34
PT	mg/L	4.82	4.64	6.43	5.30	0.80
N-Norg	mg/L	11.41	17.51	33.08	20.67	9.12
N-NH ₄ ⁺	mg/L	25.28	35.08	48.99	36.45	9.73
Colif-f	NMP/100mL	1.04E+07	2.14E+07	2.26E+07	1.81E+07	5.49E+06

Las Figuras 5.4 y 5.5 presentan la misma información que las Tablas 5.5 y 5.6 pero graficando el promedio y la desviación estándar obtenida para cada temporada de muestreo. Las barras de igual forma presentan ± la desviación estándar calculada.

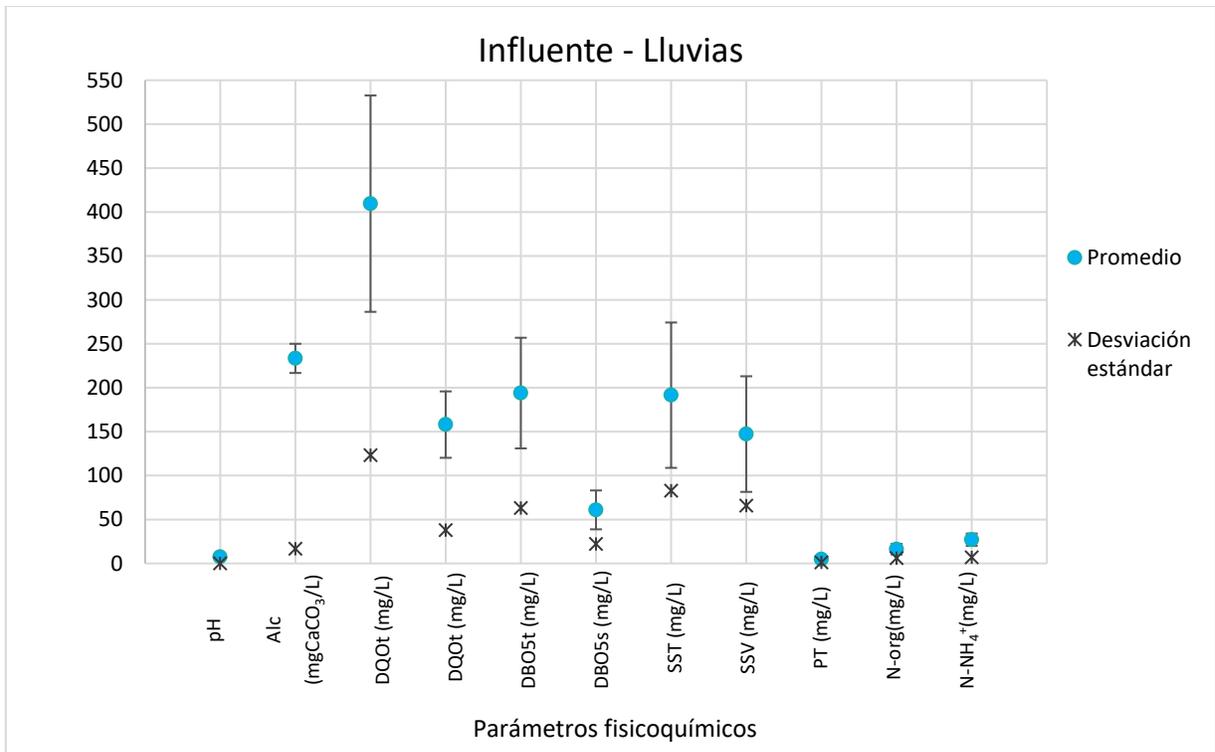


Figura 5.4. Datos históricos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de lluvias de la CDMX.

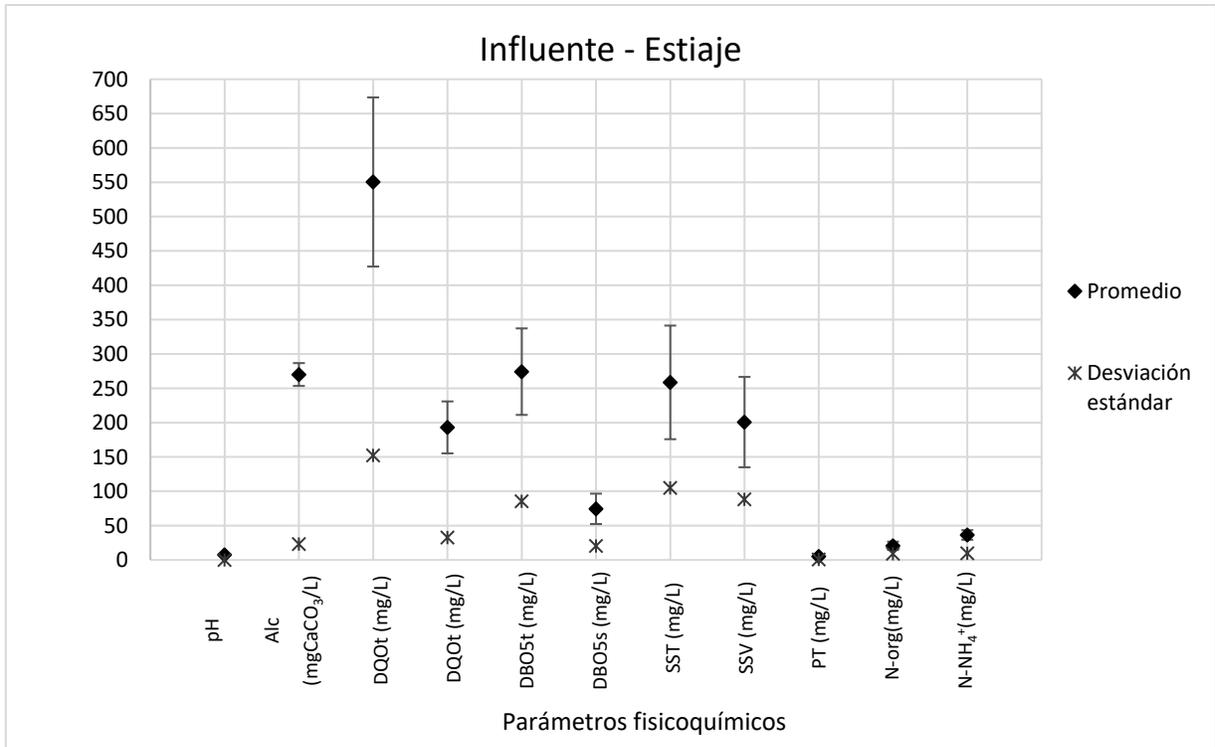


Figura 5.5. Datos históricos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influente en la temporada de estiaje de la CDMX.

Las Tabla 5.7, es un resumen de los promedios generales que se obtuvieron en las tablas 5.5, y 5.6, de datos históricos. Se realizó un promedio de estas dos temporadas (lluvias y secas) con los correspondientes valores promedio de cada temporada, para obtener un general y poderlo comparar con los resultados obtenidos en este proyecto. La Figura 5.6., va asociada a la Tabla 5.7, mostrando los datos promedio generales obtenidos, con su respectiva desviación estándar y las barras de \pm su desviación estándar.

Tabla 5.7. Caracterización del agua residual de la Cd. de México, datos históricos promedio de ambas temporadas y su promedio general.

PTAR		Agua residual de la CDMX					
Parámetro		Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Promedio General n = 2	Desviación estándar
pH		7.42	0.02	7.42	0.02	7.42	0.00
Alc	mgCaCO ₃ /L	233.39	16.61	270.06	23.19	251.73	18.33
DQOt	mg/L	409.52	123.14	550.38	152.24	479.95	70.43
DQOs	mg/L	158.04	37.81	193.08	32.75	175.56	17.52
DBO5t	mg/L	193.90	62.99	274.22	85.64	234.06	40.16
DBO5s	mg/L	60.94	22.13	74.46	20.45	67.70	6.76
SST	mg/L	191.53	82.72	258.58	104.93	225.06	33.53
SSV	mg/L	147.25	65.79	200.78	88.34	174.01	26.77
PT	mg/L	4.79	1.12	5.30	0.80	5.04	0.25
N-Norg	mg/L	16.21	6.05	20.67	9.12	18.44	2.23
N-NH ₄ ⁺	mg/L	27.05	6.99	36.45	9.73	31.75	4.70
Colif-f	NMP/100mL	2.24E+07	5.97E+06	1.81E+07	5.49E+06	2.03E+07	2.12E+06

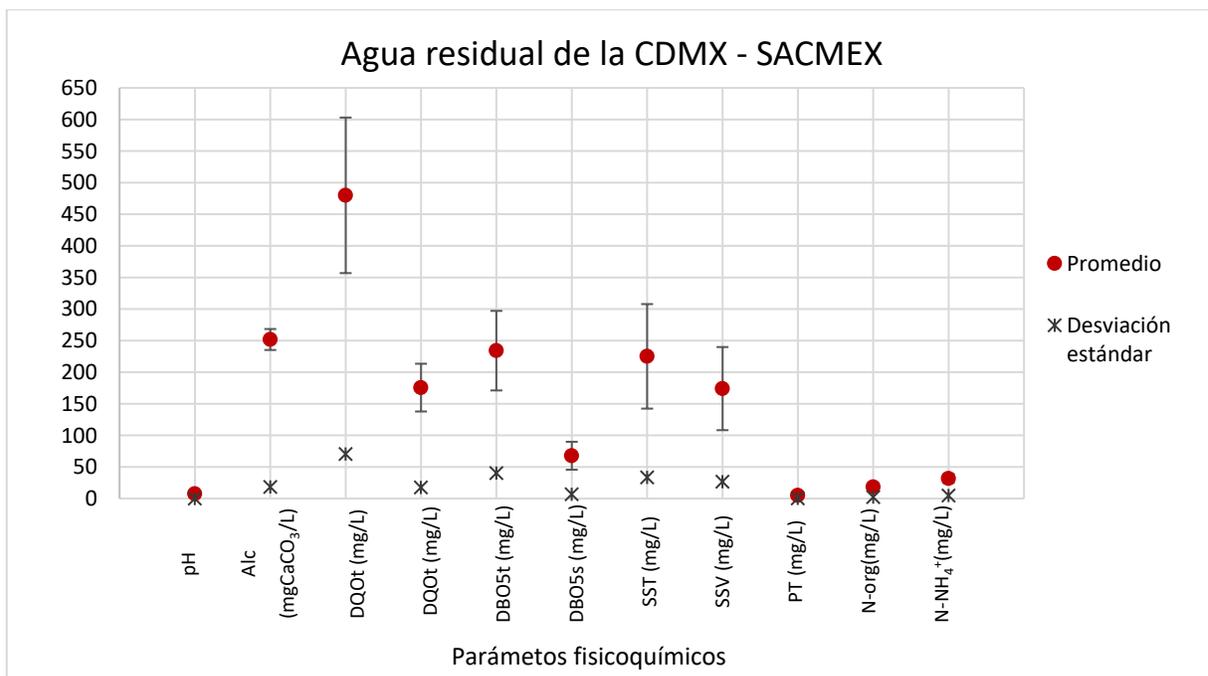


Figura 5.6. Datos históricos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua residual producida en la CDMX.

La Tabla 5.8. contiene una comparación de los datos promedios generales obtenidos en el proyecto y los resultados históricos proporcionados por SACMEX. Se realizó un promedio de las dos temporadas para obtener un valor general y poderlo comparar con los resultados obtenidos en este proyecto. Para identificar los datos obtenidos en este proyecto se agregó la notación LIA-UNAM (Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería UNAM). El promedio general calculado es de las dos temporadas, se obtuvo con un número de datos igual a dos, tanto para el LIA, como de SACMEX.

Tabla 5.8. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México, obtenida por SACMEX (datos históricos) y por LIA-UNAM (este trabajo).

PTAR		Agua residual de la CDMX					
Parámetro		Lluvias SACMEX	Lluvias LIA-UNAM	Estiaje SACMEX	Estiaje LIA-UNAM	General SACMEX	General LIA-UNAM
pH		7.42	7.3	7.42	7.04	7.42	7.17
Alc	mgCaCO ₃ /L	233	129	270	146	252	137
DQOt	mg/L	410	238	550	374	480	306
DQOs	mg/L	158	122	193	178	176	150
DBO5t	mg/L	194	ND	274	246	234	246
DBO5s	mg/L	61	ND	74	70	68	70
SST	mg/L	192	73	259	148	225	111
SSV	mg/L	147	64	201	128	174	96
PT	mg/L	4.79	2.51	5.3	3.87	5.04	3.19
N-Norg	mg/L	16	16	21	14	18	15
N-NH ₄ ⁺	mg/L	27	21	36	30	32	26
Colif-f	NMP/100mL	2.24E+07	ND	1.81E+07	1.15E+07	2.03E+07	1.15E+07

En esta tabla es posible identificar que los resultados de Alcalinidad, DQOt, SST y SSV obtenidos por SACMEX, son claramente mayores a los obtenidos en LIA. En los otros parámetros la diferencia es menor.

En las siguientes figuras se hace una comparación entre los datos obtenidos por SACMEX y el LIA-UNAM, para cada temporada estacional (lluvias y estiaje). Se graficaron puntos para los datos promedio, con su respectiva desviación estándar y las barras de \pm su desviación estándar.

En la Figura 5.7. y 5.8. se realiza una comparación entre los datos obtenidos en la temporada de lluvias y estiaje respectivamente, donde se identifica que si bien los promedios de la DQOt y de los sólidos suspendidos (SST) son claramente diferentes, se traslapan sus barras de desviación estándar, salvo en lluvias para los SST.

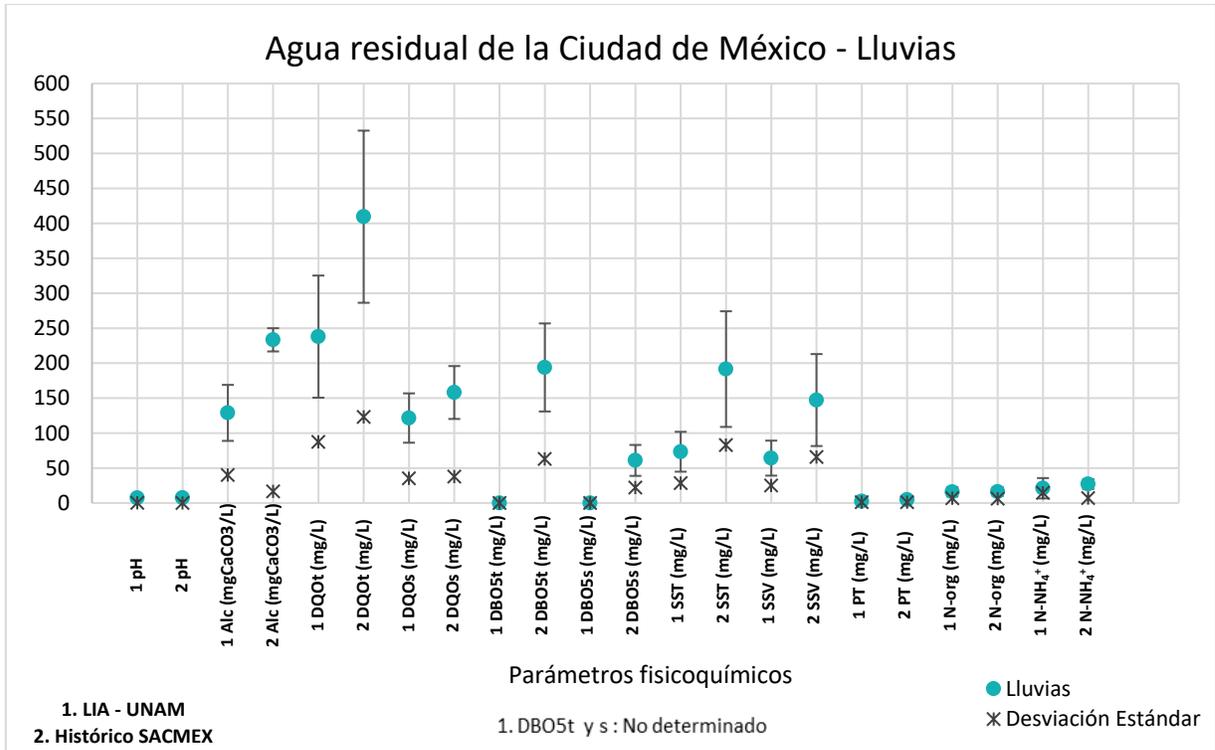


Figura 5.7. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México, en la temporada de lluvias obtenida por SACMEX y en el LIA-UNAM. Datos por pares para cada parámetro.

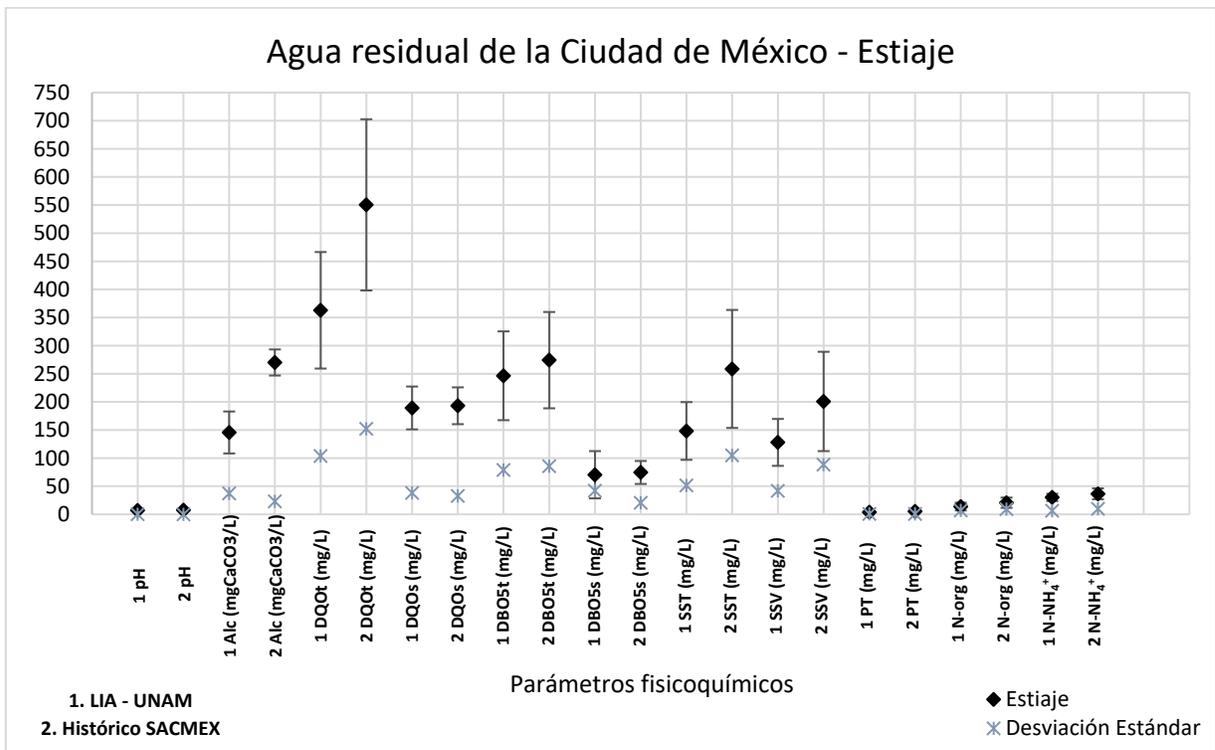


Figura 5.8. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México, en la temporada de estiaje obtenida por SACMEX y en el LIA-UNAM. Datos por pares para cada parámetro.

En la Figura 5.9. se comparan los datos obtenidos en este trabajo para las dos temporadas. Se identifica que los valores promedio de DQO total y soluble, SST y SSV en la época de estiaje son mayores; sin embargo, las correspondientes barras de desviación estándar se traslapan, por lo que los promedios no se diferencian estadísticamente. El resto de los parámetros graficados tienen valores promedio similares, y se puede concluir que la variación estacional no influyó en su concentración.

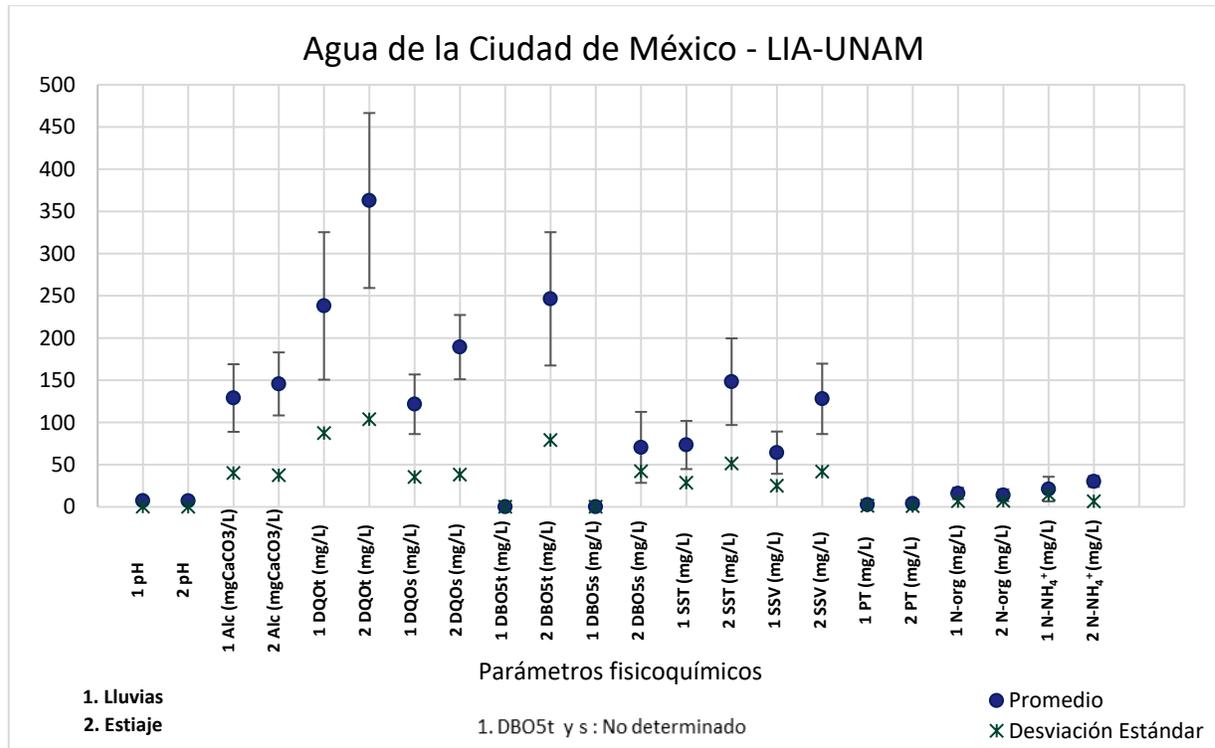


Figura 5.9. Comparación de la caracterización del agua residual de la Cd. de México obtenida en este trabajo, durante la temporada de lluvias y estiaje. Datos por pares para cada parámetro.

En forma complementaria, la Figura 5.10. presenta el comparativo de los datos históricos de SACMEX para las temporadas de lluvias y de estiaje. Siguiendo la misma tendencia de los datos obtenidos en este trabajo (Figura 5.9), de nuevo son los parámetros de DQO total, SST, SSV, además de la DBO total, los que presentan valores promedio claramente superiores en la época de estiaje. Sin embargo, las barras de desviación estándar para las dos temporadas se traslapan, por lo que nuevamente se considera no tienen diferencia significativa.

Los demás parámetros faltantes, tienen valores promedio similares, y se puede afirmar que la variación estacional no influye en su concentración, conclusión similar a la obtenida con los datos producto de este trabajo.

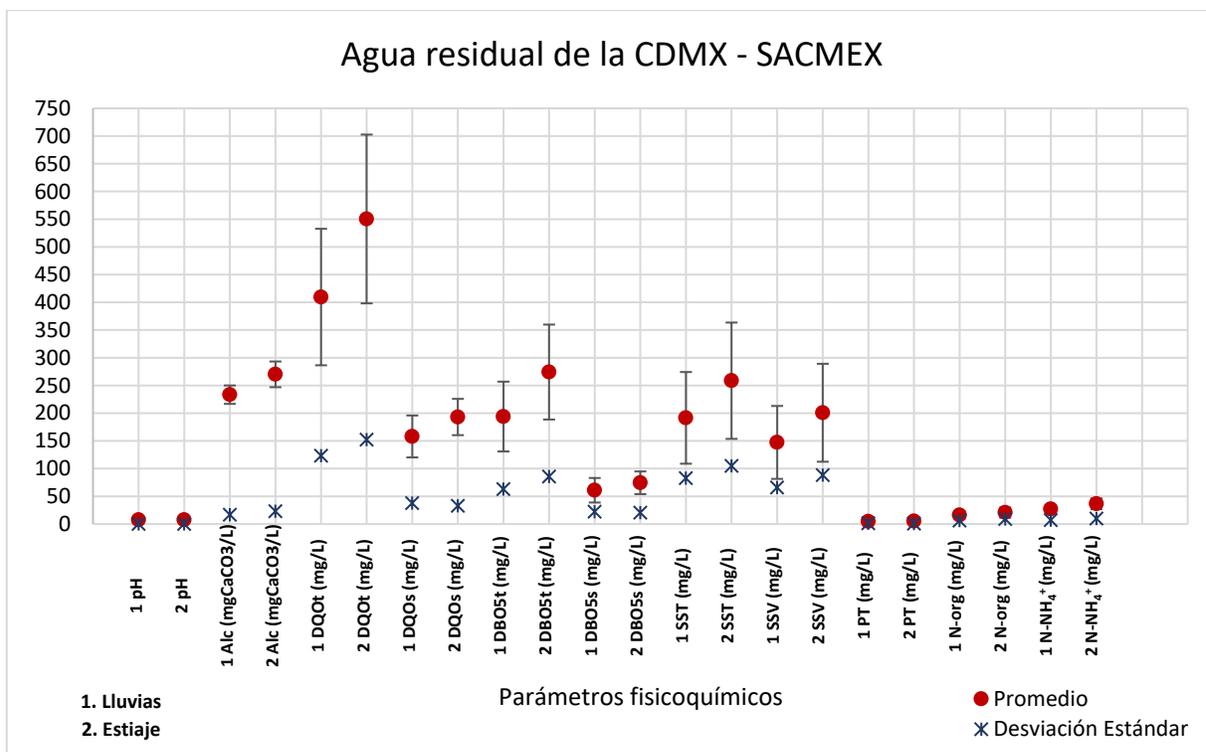


Figura 5.10. Comparación de la caracterización con datos históricos (SACMEX) del agua residual de la Cd. de México, durante la temporada de lluvias y estiaje. Datos por pares para cada parámetro.

La información obtenida de los análisis de la calidad del agua residual de la Ciudad de México, que realizó SACMEX y el LIA-UNAM, al compararse entre sí, no muestran diferencias significativas si se aplica el criterio de los intervalos de la desviación estándar, aunque, como se ha presentado, algunos parámetros muestran valores promedio claramente diferentes.

5.3. INFLUENCIA DE LLUVIA Y ESTIAJE EN LA CALIDAD DEL AGUA INFLUENTE PARA CADA PTAR EVALUDA Y SU DESEMPEÑO

En el subcapítulo anterior se presentó la caracterización del agua residual generada en la Cd. de México para ambas temporadas (lluvias y estiaje) y en conjunto. En este subcapítulo se muestran los resultados obtenidos para cada una de las cuatro PTAR, en lo que respecta las variaciones en la entrada (agua influente) por temporada y los efectos en su efluente, por lo tanto, en su desempeño (eficiencia de remoción).

5.3.1. Análisis estadístico

En este subcapítulo, como se había mencionado anteriormente, se realizó un análisis estadístico de los parámetros (pH, DQO t y s, ST, STV, SST, SSV, NTK y N-NH₄⁺) siendo los más relevantes para medir la calidad del agua influente de cada PTAR estudiada, mediante pruebas de ANOVA y Tukey-Kramer con el programa JMP®: Statistical Software. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.9 y 5.10.

Para identificar cada planta de tratamiento en el software se utilizó la siguiente terminología:

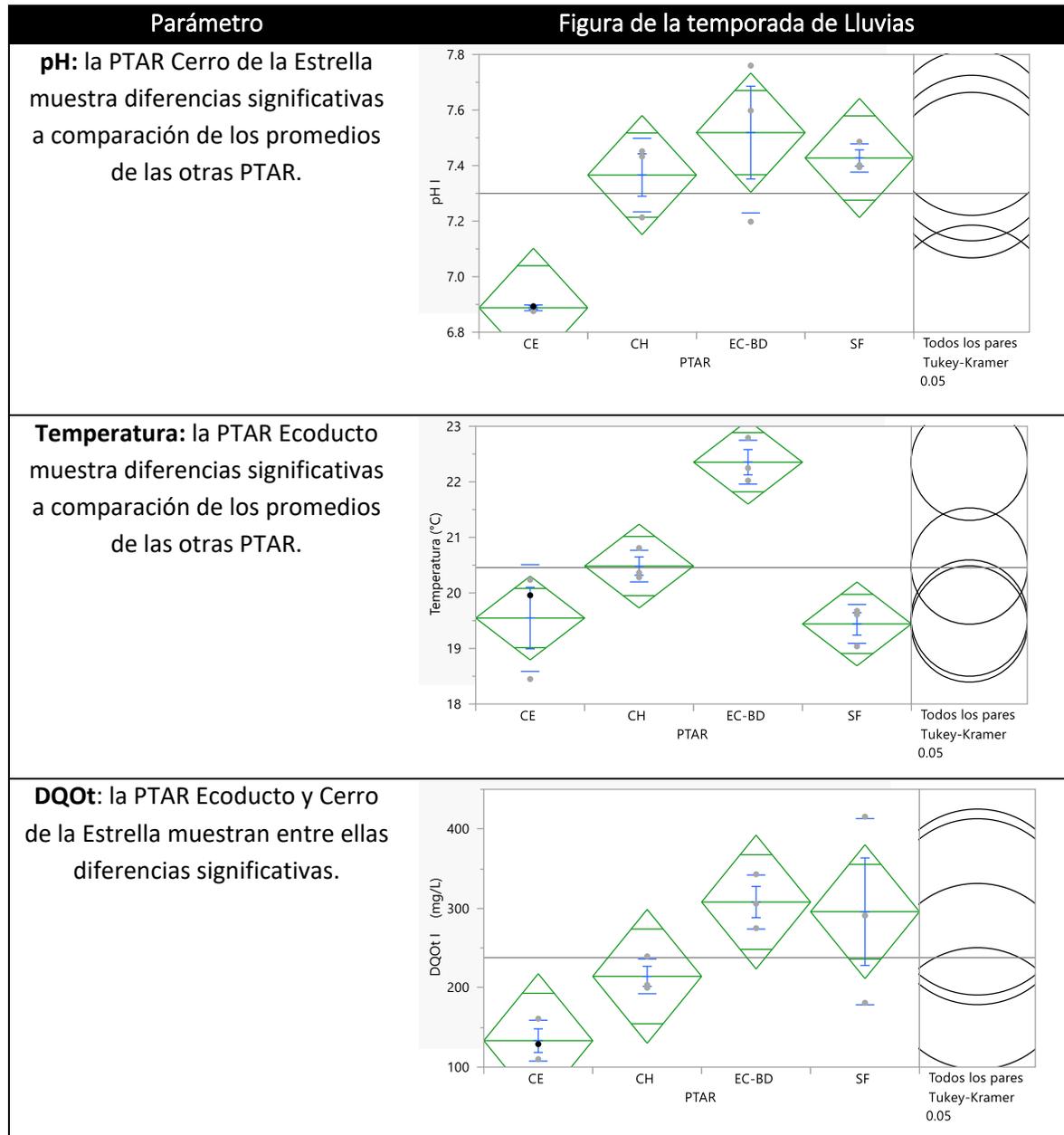
CE: PTAR Cerro de la Estrella

CH: PTAR Chapultepec

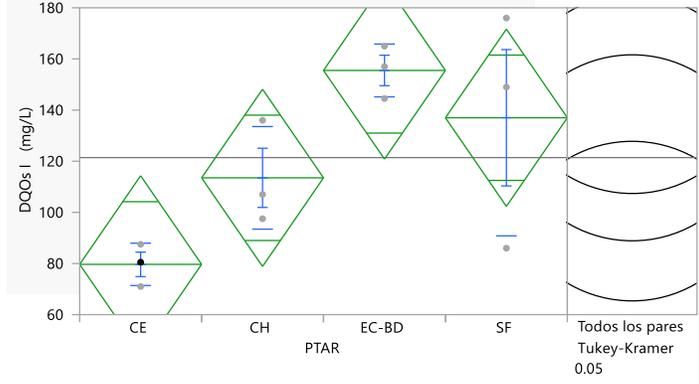
SF: PTAR Santa Fe

EC-BD: PTAR Ecoducto

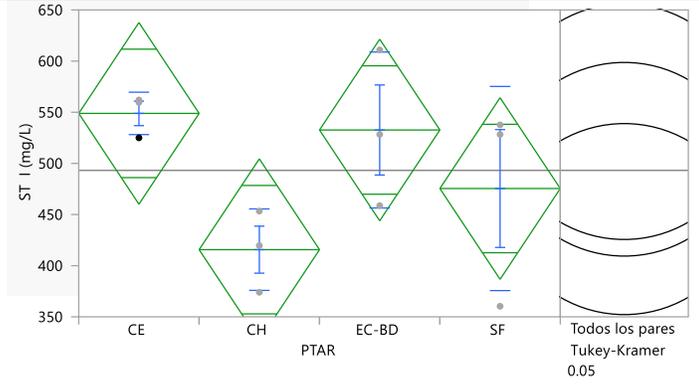
Tabla 5.9. Comparación del agua influente en temporada de lluvias de cada PTAR estudiada mediante el análisis estadístico Tukey-Kramer.



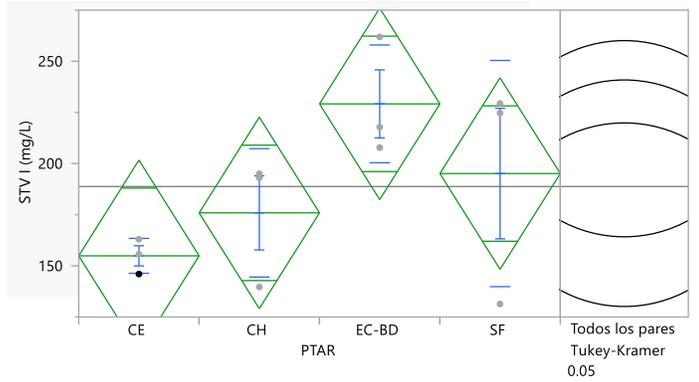
DQOs: la PTAR Ecoducto y Cerro de la Estrella muestran entre ellas diferencias significativas.



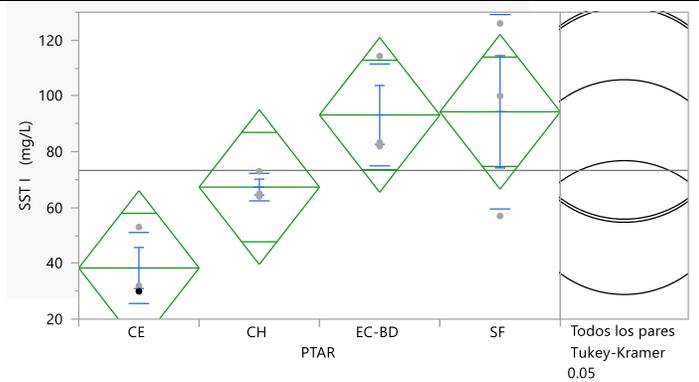
ST: las PTAR no muestran diferencias significativas entre sí.



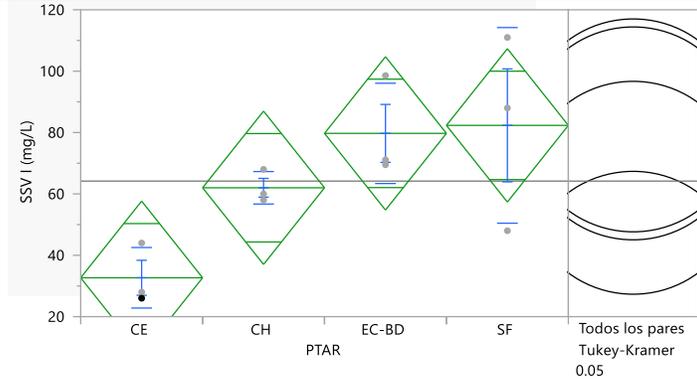
STV: las PTAR no muestran diferencias significativas entre sí.



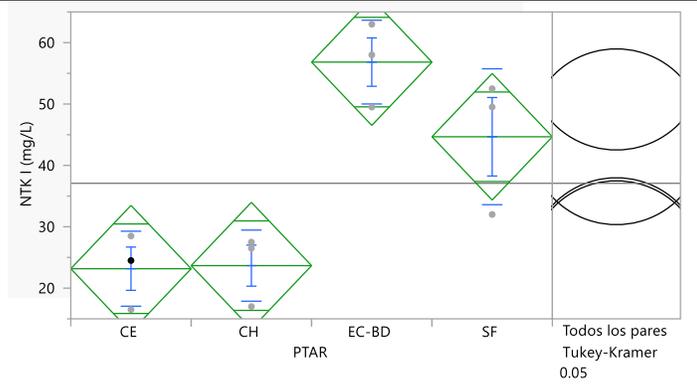
SST: la PTAR Cerro de la Estrella muestra diferencias significativas con las PTAR Ecoducto y Santa Fe.



SSV: la PTAR Cerro de la Estrella muestra diferencias significativas con las PTAR Ecoducto y Santa Fe.



NTK: Las PTAR Cerro de la Estrella y Chapultepec tienen diferencias significativas con las PTAR Ecoducto y Santa Fe.



N-NH₄⁺: Las PTAR Cerro de la Estrella y Chapultepec tienen diferencias significativas con las PTAR Ecoducto y Santa Fe.

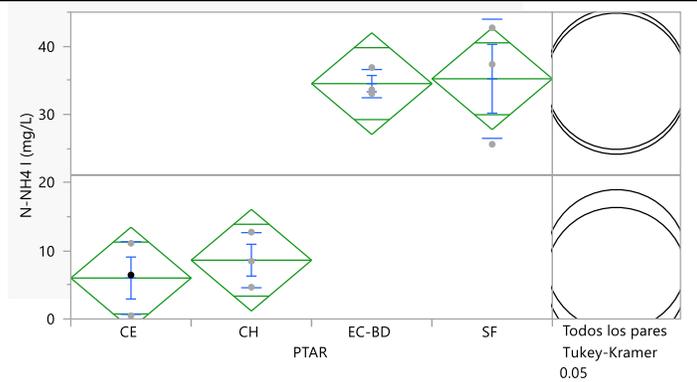
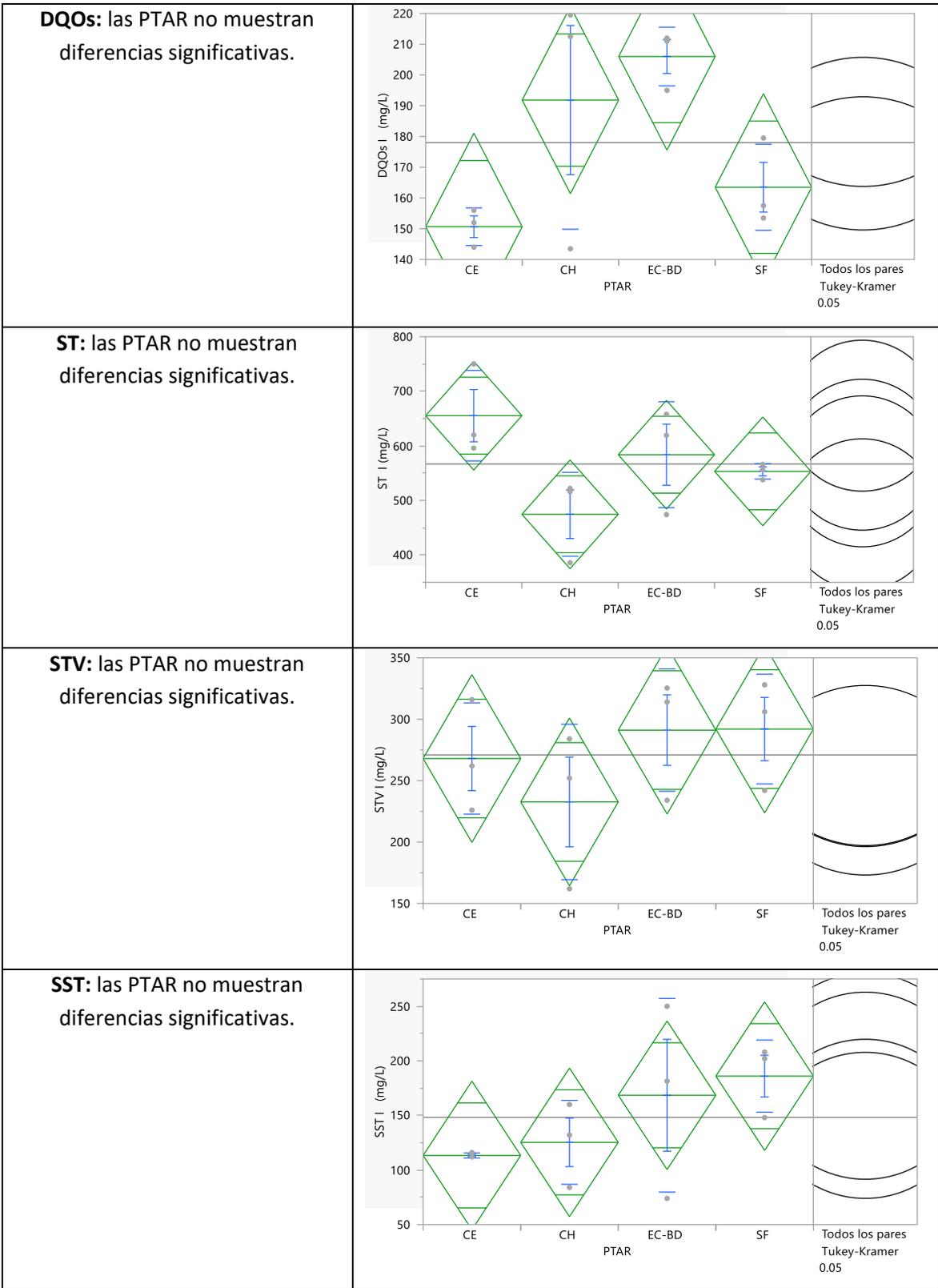
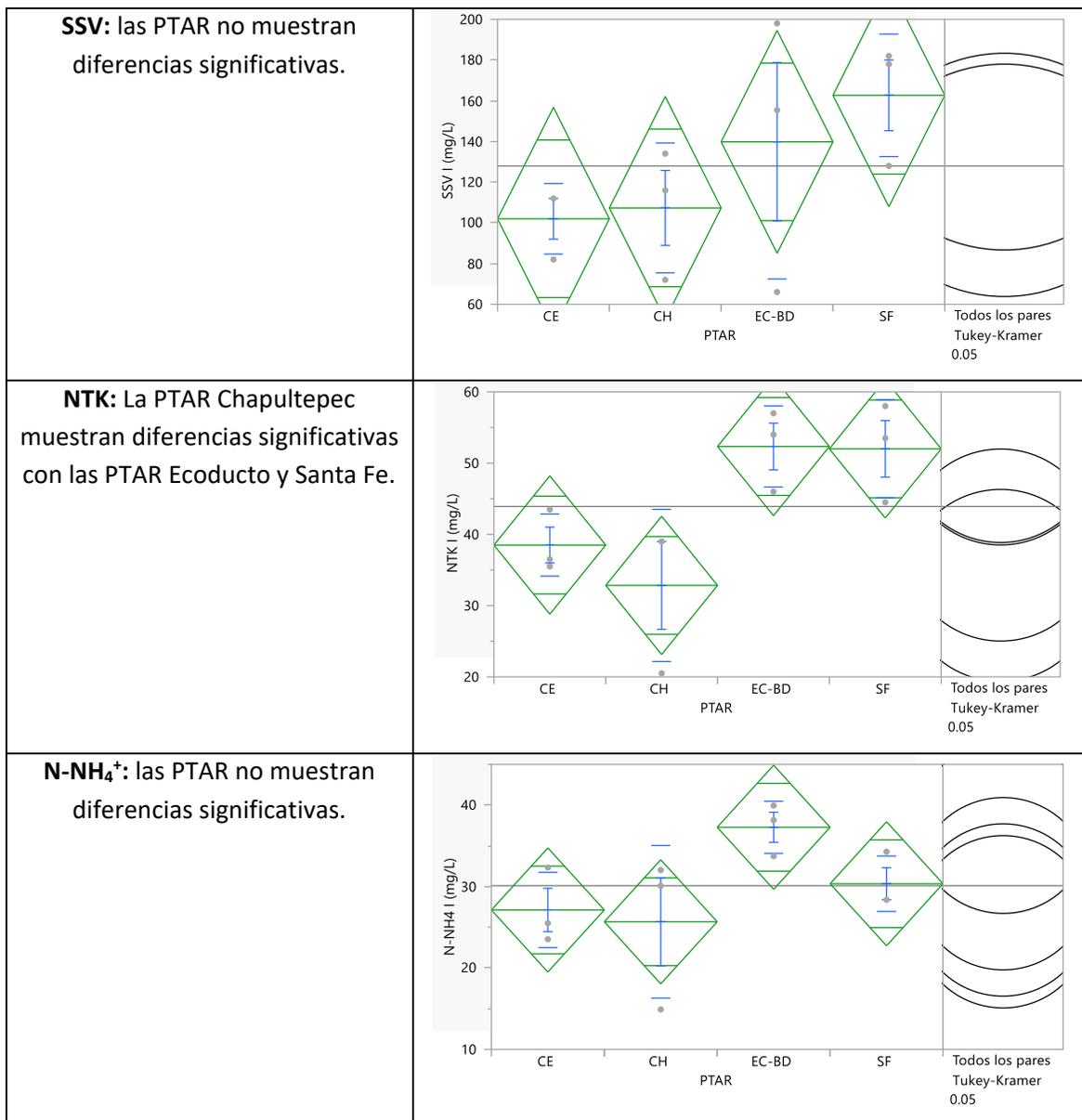


Tabla 5.10. Comparación del agua influente en temporada de estiaje de cada PTAR estudiada mediante el análisis estadístico Tukey-Kramer.

Parámetro	Figura de la temporada de Estiaje
<p>pH: la PTAR Santa Fe muestra diferencias significativas con las PTAR Cerro de la Estrella y Chapultepec.</p>	<p>Todos los pares Tukey-Kramer 0.05</p>
<p>Temperatura: la PTAR Ecoducto muestra diferencias significativas a comparación de los promedios de las otras PTAR.</p>	<p>Todos los pares Tukey-Kramer 0.05</p>
<p>DQOt: las PTAR no muestran diferencias significativas.</p>	<p>Todos los pares Tukey-Kramer 0.05</p>





Con base en la información anterior, se puede concluir que entre las cuatro PTAR, la ocurrencia de diferencias significativas entre sus parámetros de calidad influyente se reduce en la temporada de estiaje, si se compara con la que se presenta en lluvias. En esta última, la planta con mayor número de parámetros con diferencias significativas, comparando con las demás plantas, fue la de Cerro de la Estrella, seguida de Ecoducto.

5.3.2. PTAR Cerro de la Estrella

Los datos de entrada y salida de la PTAR Cerro de la Estrella, tanto en lluvias como en estiaje, se presentan en la Tabla 5.11. Se muestra el promedio de los tres datos obtenidos en las dos semanas de muestreo y el porcentaje de remoción alcanzado para cada parámetro, por temporada.

Las Figuras 5.11 y 5.12 contienen los datos para el influente y efluente, respectivamente, de parámetros seleccionados como particularmente relevantes de la Tabla 5.11, haciendo una comparación para las dos temporadas. Se presentan los promedios, su respectiva desviación estándar y las barras de \pm desviación estándar (ver Anexo A1 para datos influente y A2 para efluente).

Tabla 5.11. Caracterización de agua influente y efluente para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Cerro de la Estrella y eficiencias de remoción.

CERRO DE LA ESTRELLA							
Parámetro		Lluvias		%	Estiaje		%
		Influente	Efluente	Remoción	Influente	Efluente	Remoción
pH		6.89	6.87	-	6.95	6.88	32.73
Alc	mgCaCO ₃ /L	158.67	124.67	21.43	185.83	125.00	90.35
DQOt	mg/L	133.33	29.83	77.63	295.33	28.50	87.28
DQOs	mg/L	79.67	21.17	73.43	150.67	19.17	ND
DBO5t	mg/L	ND	ND	ND	131.56	45.57	ND
DBO5s	mg/L	ND	ND	ND	12.20	9.35	89.13
COTT*	mg/L	44.44	5.39	87.87	83.50	9.08	86.91
COTs*	mg/L	26.67	5.22	80.43	65.17	8.53	26.50
ST	mg/L	548.89	520.56	5.16	655.33	481.67	51.93
STV	mg/L	154.89	140.89	9.04	268.00	128.83	8.90
STF	mg/L	394.00	379.67	3.64	387.33	352.84	90.29
SST	mg/L	38.33	6.67	82.60	113.33	11.00	90.69
SSV	mg/L	32.67	5.33	83.69	102.00	9.50	86.76
SSF	mg/L	5.66	1.34	76.33	11.33	1.50	13.16
SDT	mg/L	510.56	513.89	-0.65	542.00	470.67	28.11
SDV	mg/L	122.22	135.56	-10.91	166.00	119.33	6.56
SDF	mg/L	388.33	378.33	2.58	376.00	351.33	96.64
Surfactantes	mg/L	3.39	0.33	90.27	4.47	0.15	81.91
PT	mg/L	2.63	1.33	49.43	3.98	0.72	82.00
PO ₄ ³⁻	mg/L	8.10	4.13	49.01	12.22	2.20	61.48
NTK	mg/L	23.17	12.33	46.78	38.50	14.83	3.16
N-Norg	mg/L	17.16	12.75	25.70	11.38	11.02	85.91
N-NH ₄ ⁺	mg/L	6.00	7.63	-27.17	27.12	3.82	32.73
N-NO ₃ ⁻	mg/L	2.95	0.00	100.00	2.70	4.05	-50.00
N-NO ₂ ⁻	mg/L	0.00	0.00	-	0.01	0.32	-3100.00
Colifecales	NMP/100mL	ND	ND	ND	5.83E+06	933.33	99.98
ColifTotales	NMP/100mL	1.16E+07	308.64	100.00	ND	ND	ND
Huevos de Helminto	HH/L	1.20	0.07	94.17	1.67	0.27	83.83
Conductividad	μs/cm	849.42	765.58	-	927.47	799.58	-
Temperatura	°C	19.55	19.71	-	19.76	20.23	-

ND: No determinado

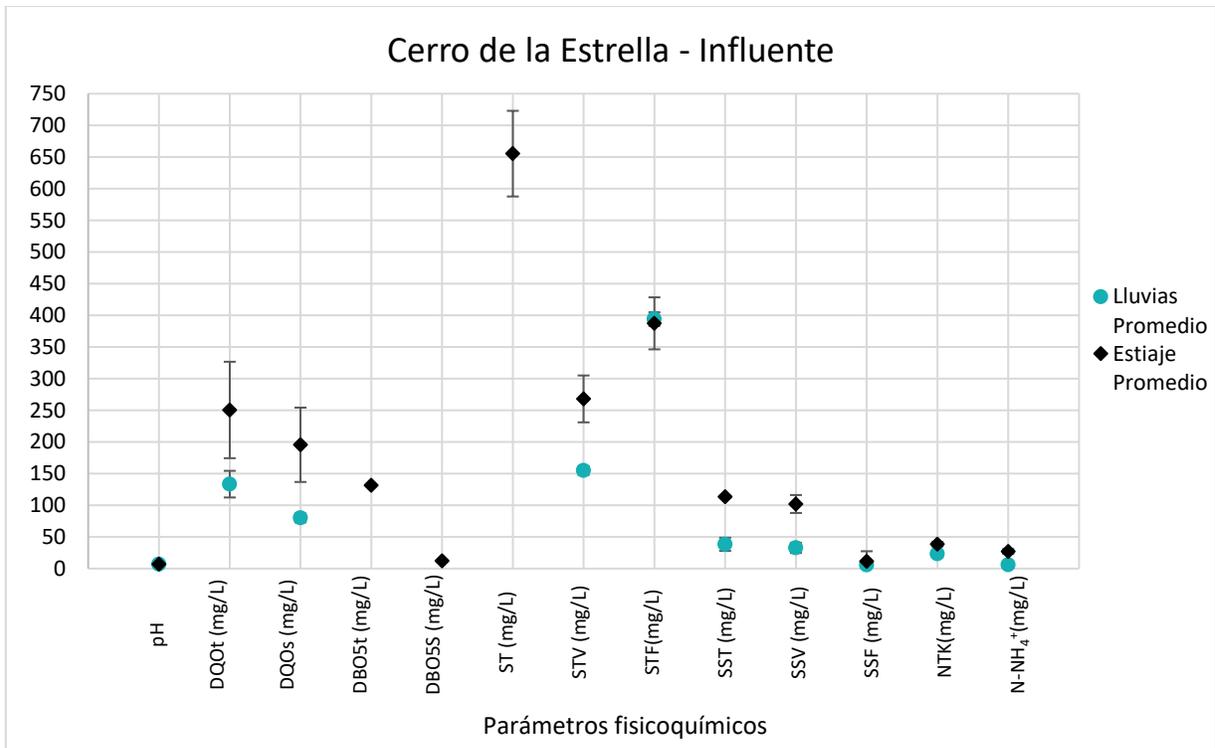


Figura 5.11. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua influyente de la PTAR Cerro de la Estrella para ambas temporadas (lluvias y estiaje).

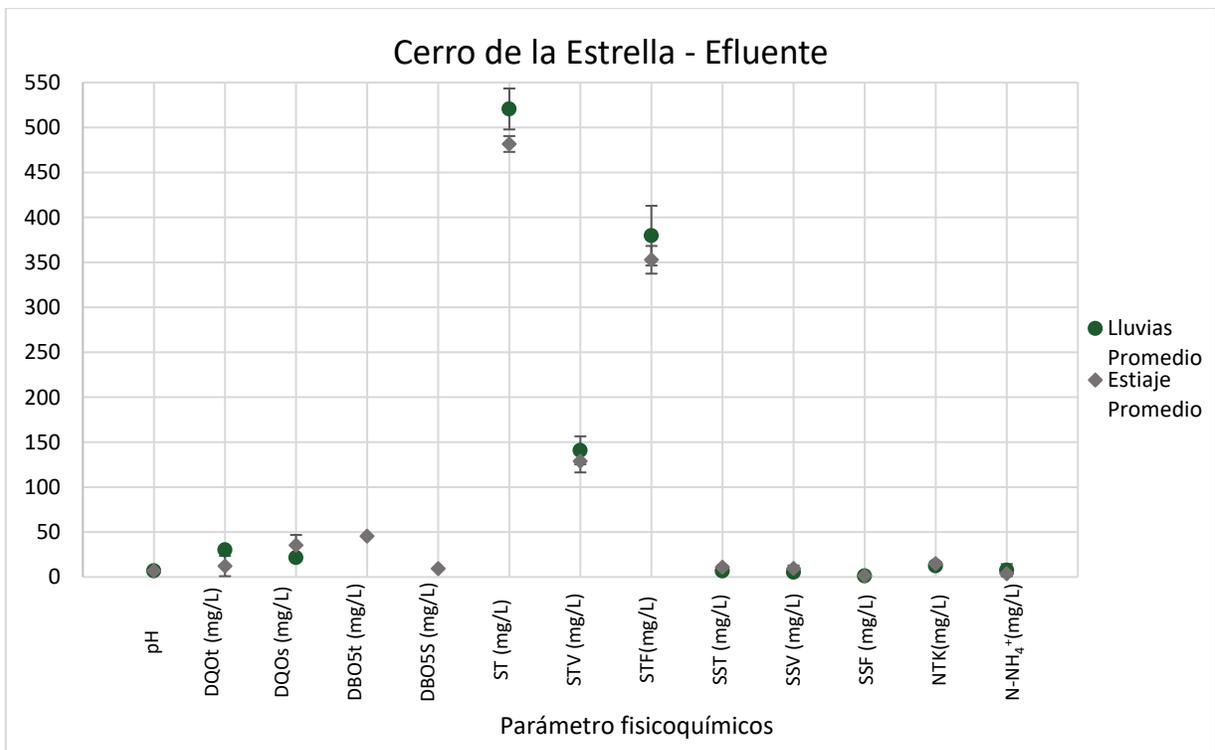


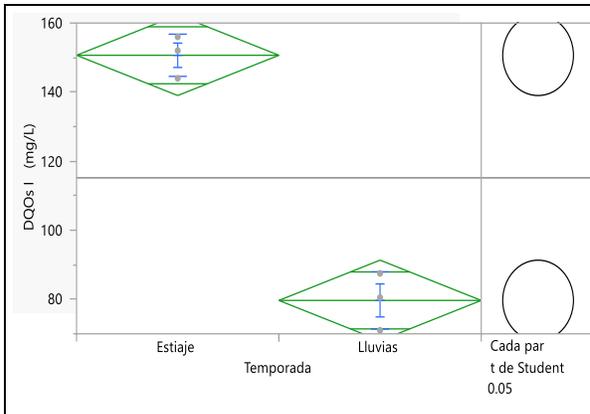
Figura 5.12. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Cerro de la Estrella para ambas temporadas (lluvias y estiaje).

Los promedios de dos parámetros importantes en el influente como la DQO total (295.33 mg/L) y la DQO soluble (150.67 mg/L) de la temporada de estiaje son claramente superiores a los correspondientes de la temporada de lluvias: DQO total (133.98 mg/L) y DQO soluble (79.67 mg/L). En general, los rangos de las desviaciones estándar muestran diferencias estadísticamente significativas entre lluvias y estiaje, para los parámetros DQO total y soluble, STV, SST y SSV, como se puede observar la Figura 5.11.

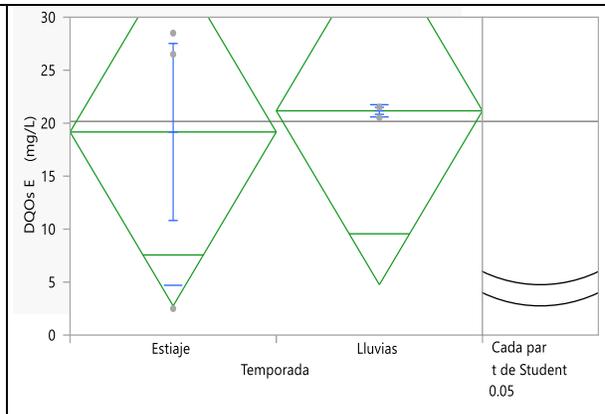
Para identificar las diferencias significativas entre los parámetros relevantes graficados en las Figuras 5.11 y 5.12 se realizó una prueba de t de Student. Los resultados se muestran en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Comparación del agua influente y efluente de la PTAR Cerro de la Estrella para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico T de student.

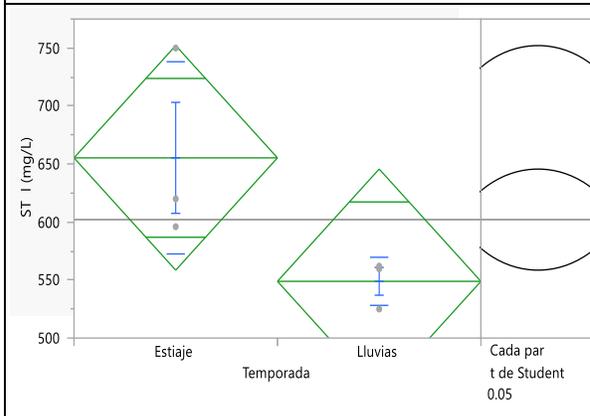
CERRO DE LA ESTRELLA			
Influente	Efluente		
		Cada par t de Student 0.05	
<p>pH: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>pH: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>		
		Cada par t de Student 0.05	
<p>DQOt: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>DQOt: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>		



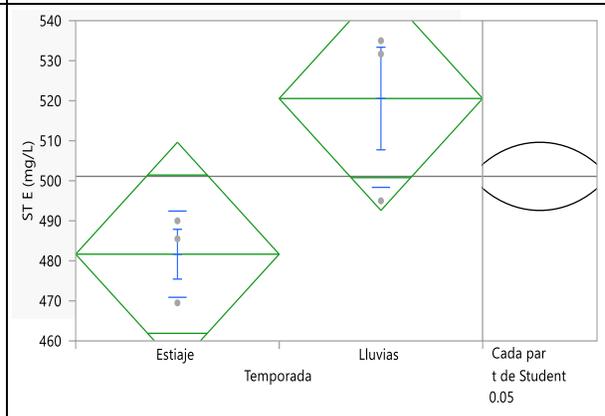
DQOs: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



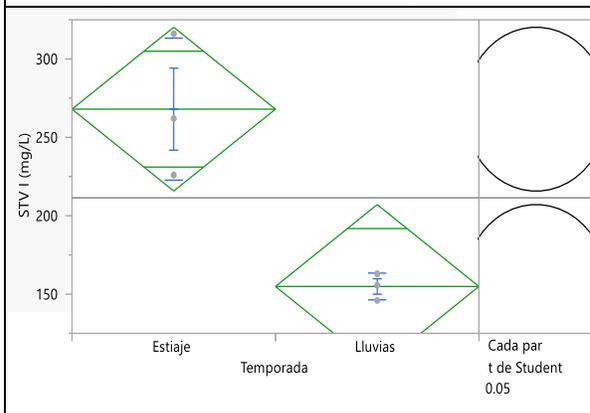
DQOs: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



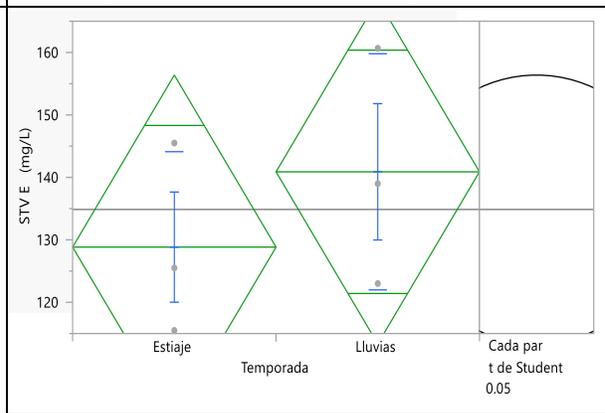
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



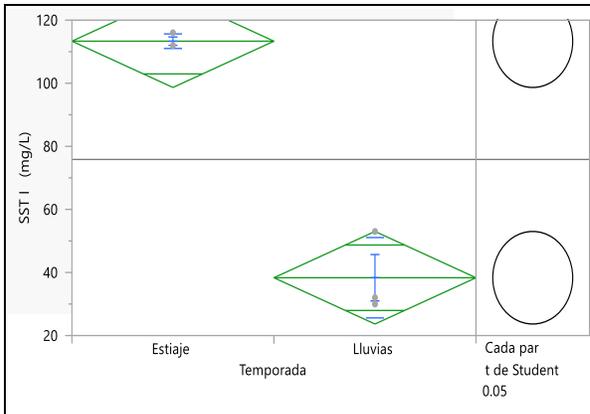
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



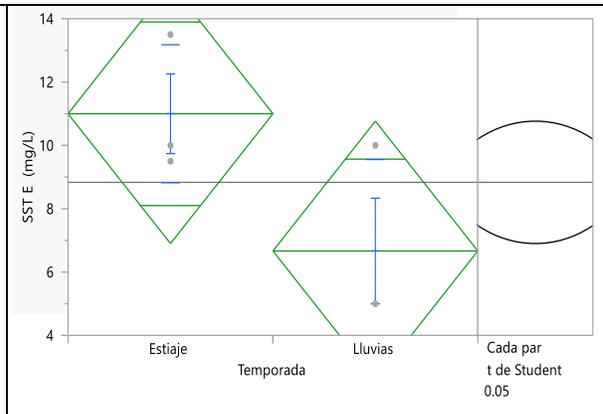
STV: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



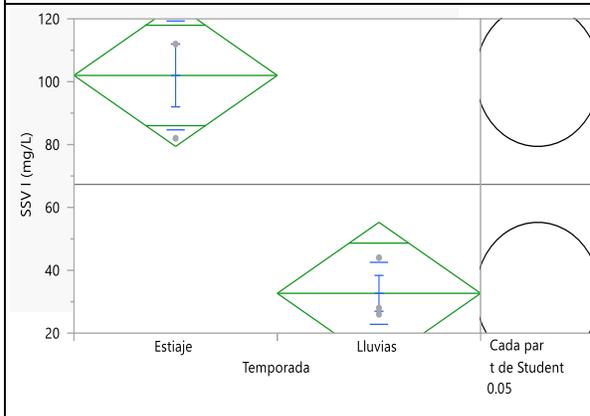
STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



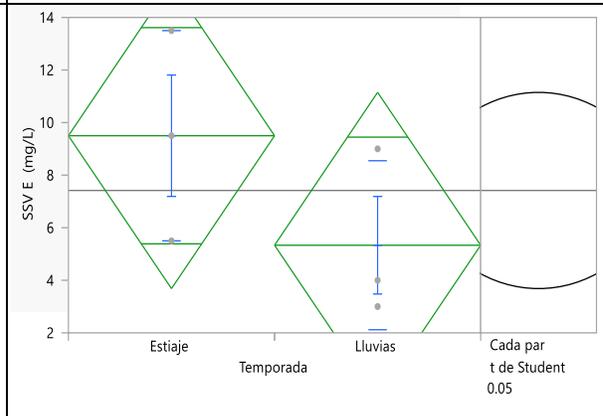
SST: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



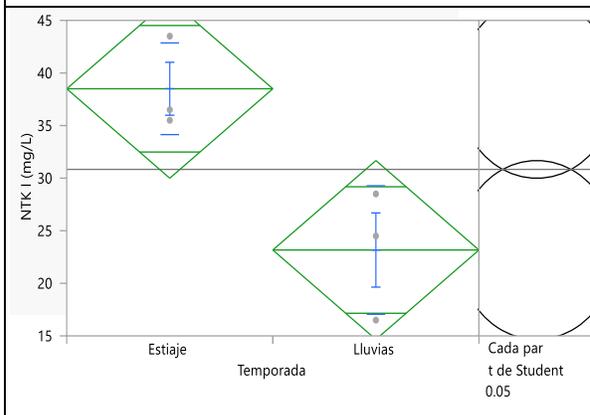
SST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



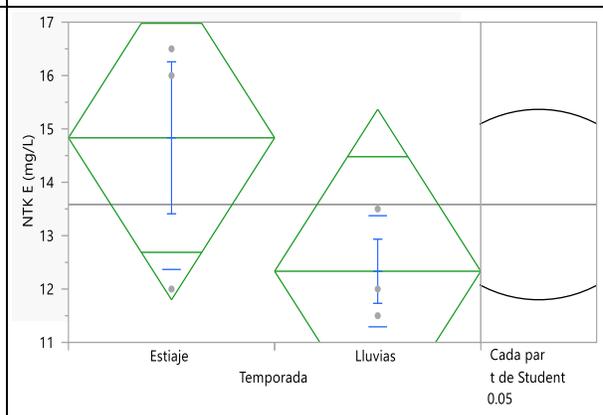
SSV: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



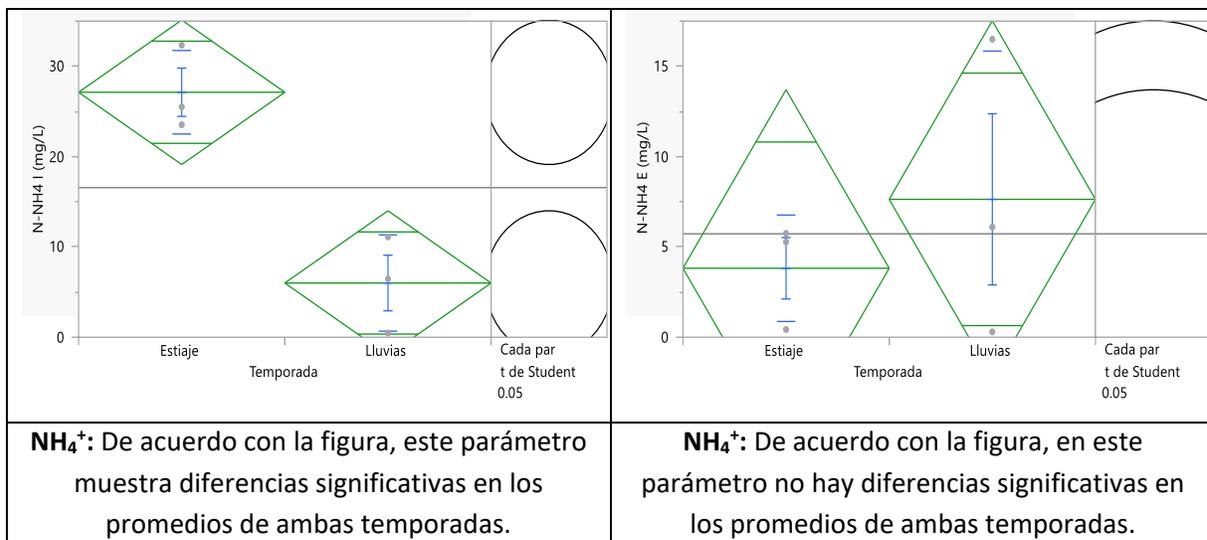
SSV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



NTK: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



NTK: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



De acuerdo con el análisis estadístico de la Figura 5.12, las variaciones del agua influente de Cerro de la Estrella en ambas estaciones no resultan en diferencias significativas en el efluente de la planta. Esto indica que el proceso de tratamiento amortigua los cambios de concentración en la entrada, produciendo una calidad de agua prácticamente constante.

Con el análisis de los datos de ambas temporadas estacionales, se puede afirmar que la planta está cumpliendo con la calidad de descarga emitida por la normatividad vigente.

5.3.3. PTAR Chapultepec

La planta de tratamiento Chapultepec, es la más nueva y con tecnología más avanzada en la Ciudad de México. La anterior instalación remontaba al año 1956, de la cual solo se conservó la estructura del pretratamiento, dando lugar a la construcción en 2015 de una planta moderna. La Tabla 5.13., contiene los datos promedio de la caracterización de agua influente y efluente, tanto para lluvias como para estiaje. Los valores son resultado de promediar los tres datos obtenidos por semana. En esta misma tabla se realizó el cálculo de la remoción de contaminantes, para ambas temporadas.

La Figura 5.13. y 5.14., contienen los datos seleccionados como relevantes de influente y efluente, respectivamente, con una comparativa entre los valores de lluvias y estiaje. Se presentan los datos promedio y su respectiva desviación estándar (Anexo A1 y Anexo A2).

Tabla 5.13. Caracterización de agua influente y efluente para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Chapultepec y eficiencias de remoción.

CHAPULTEPEC							
Parámetro		Lluvias		% Remoción	Estiaje		% Remoción
		Influente	Efluente		Influente	Efluente	
pH		7.37	6.75	-	6.96	7.02	-
Alc	mgCaCO ₃ /L	80.33	60.33	24.90	93.33	50.00	46.43
DQOt	mg/L	214.33	15.33	92.85	376.83	18.83	95.00
DQOs	mg/L	113.50	11.33	90.02	191.83	14.00	92.70
DBO5t	mg/L	ND	ND	ND	345.85	23.19	ND
DBO5s	mg/L	ND	ND	ND	127.49	10.98	ND
COTT*	mg/L	71.56	6.17	91.38	125.61	5.88	95.32
COTs*	mg/L	37.89	5.53	85.41	63.94	5.42	91.52
ST	mg/L	415.67	308.78	25.72	474.67	300.50	36.69
STV	mg/L	175.89	66.00	62.48	232.67	64.50	72.28
STF	mg/L	239.78	242.78	-1.25	242.00	236.00	2.48
SST	mg/L	67.33	2.67	96.03	125.33	1.83	98.54
SSV	mg/L	62.00	2.67	95.69	107.33	1.83	98.29
SSF	mg/L	5.33	0.00	100.00	18.00	0.00	100.00
SDT	mg/L	348.33	306.11	12.12	349.33	298.67	14.50
SDV	mg/L	113.89	63.33	44.39	125.33	62.67	50.00
SDF	mg/L	234.44	242.78	-3.56	224.00	236.00	-5.36
Surfactantes	mg/L	3.72	0.09	97.58	5.70	0.00	100.00
PT	mg/L	1.17	0.27	76.92	2.88	1.50	47.92
PO ₄ ³⁻	mg/L	3.53	0.70	80.17	8.92	4.57	48.77
NTK	mg/L	23.67	4.33	81.71	32.83	2.33	92.90
N-Norg	mg/L	15.05	4.33	71.23	7.16	2.24	68.72
N-NH ₄ ⁺	mg/L	8.62	1.20	86.08	25.67	0.10	99.61
N-NO ₃ ⁻	mg/L	1.57	0.00	100.00	2.13	0.90	57.75
N-NO ₂ ⁻	mg/L	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	100.00
Colifecales	NMP/100mL	ND	ND	ND	4.53E+06	646.67	99.99
ColifTotales	NMP/100mL	4.78E+07	205.28	100.00	ND	ND	ND
Huevos de Helminto	HH/L	0.60	0.00	100.00	0.80	0.00	100.00
Conductividad	µs/cm	568.36	473.03	-	541.33	542.47	-
Temperatura	°C	20.48	21.03	-	20.68	21.06	-

ND: No determinado

Los promedios de dos parámetros importantes en el influente como la DQO total (376.83 mg/L) y la DQO soluble (191.83 mg/L) de la temporada de estiaje son claramente superiores a los correspondientes de la temporada de lluvias: DQO total (214.33 mg/L) y DQO soluble (113.50 mg/L). Para la temporada de lluvias, la Figura 5.13 muestra que en general los parámetros tienen una menor dispersión de datos en comparación con la temporada de estiaje. Sin embargo, la temporada de estiaje presenta mayores concentraciones promedio en cada uno de los parámetros evaluados.

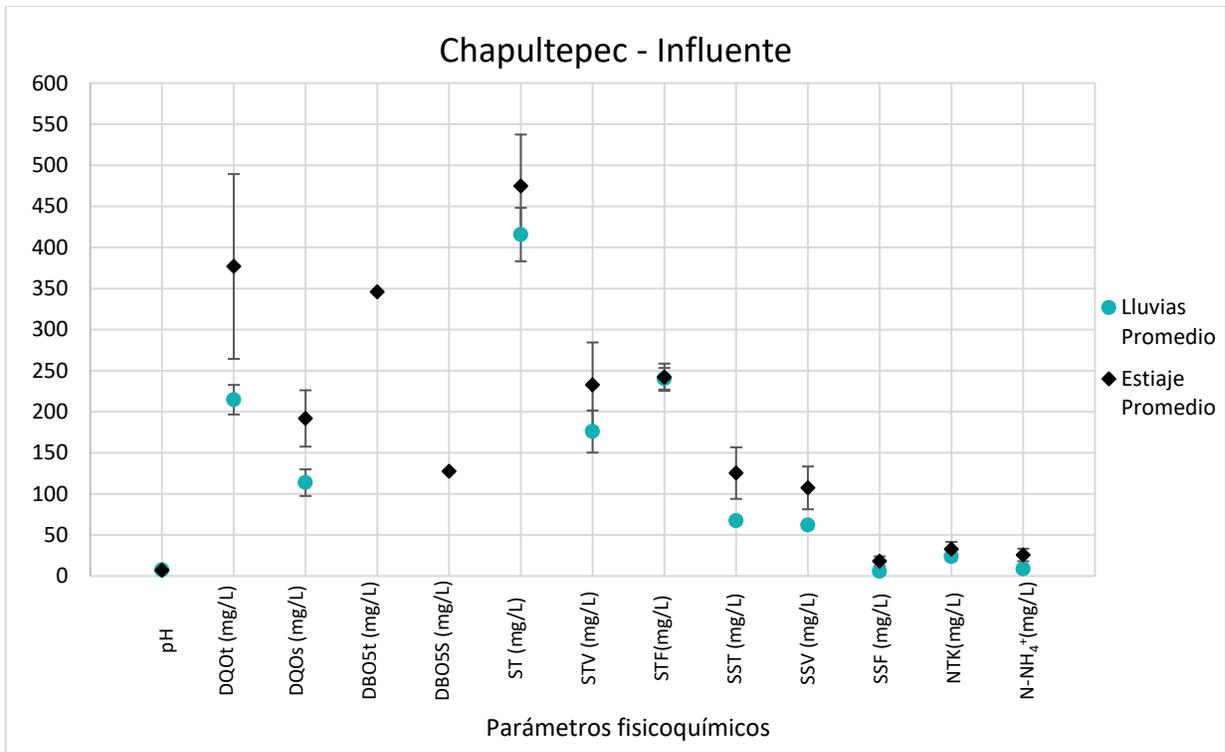


Figura 5.13. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua influyente de la PTAR Chapultepec para ambas temporadas (lluvia y estiaje).

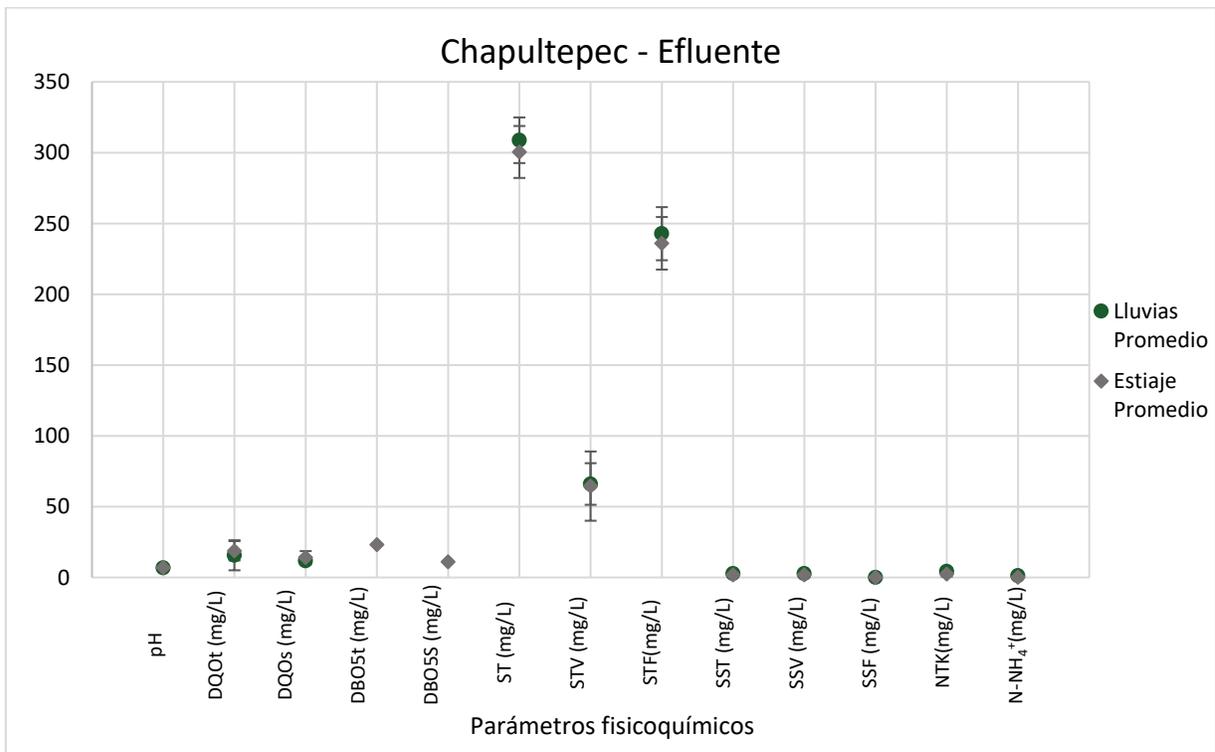
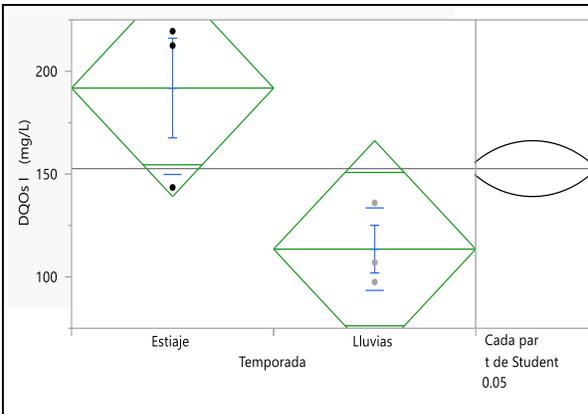


Figura 5.14. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Chapultepec para ambas temporadas (lluvia y estiaje).

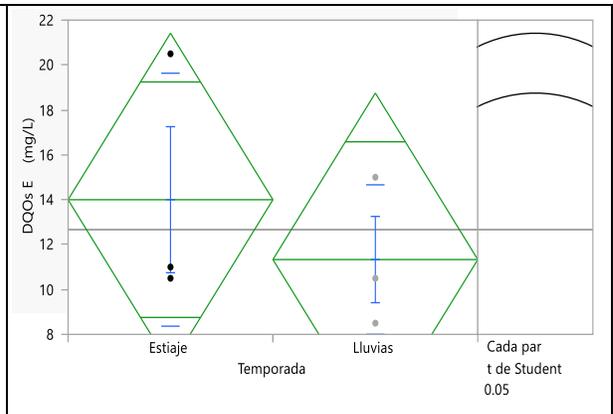
Para identificar las diferencias significativas entre los parámetros relevantes graficados en las Figuras 5.13 y 5.14 de esta PTAR, se realizó una prueba de t de Student los resultados se muestran en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Comparación del agua influyente y efluente de la PTAR Chapultepec para ambas temporadas (Lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico t de Student.

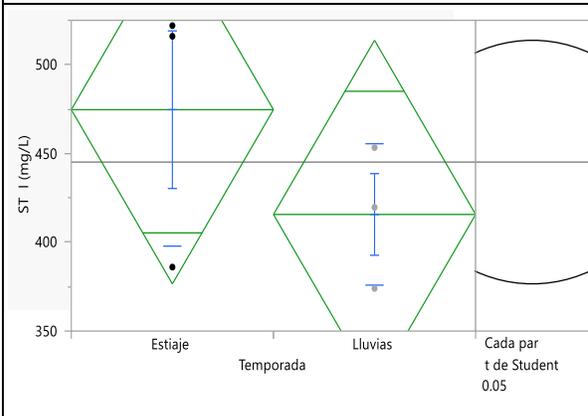
CHAPULTEPEC			
Influyente	Efluente		
<p>pH: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>pH: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>		
<p>DQOt: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>DQOt: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>		



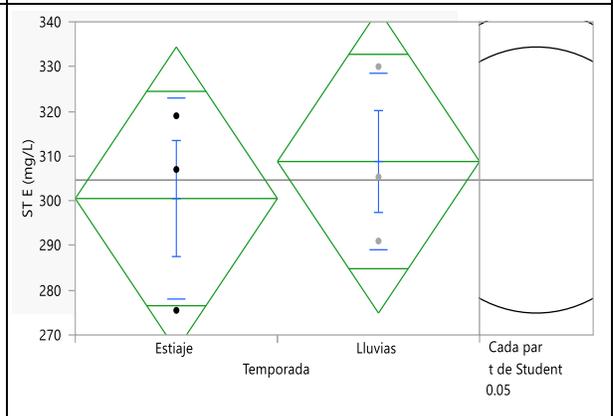
DQOs: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



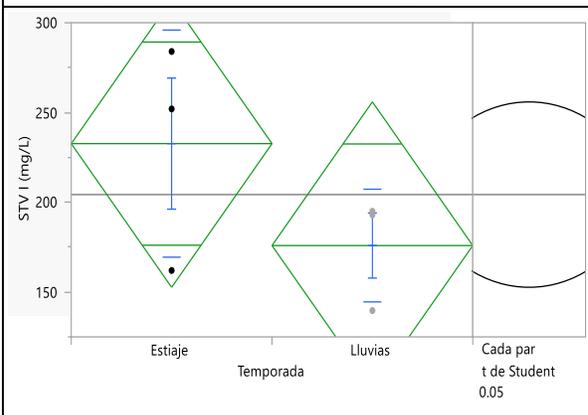
DQOs: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



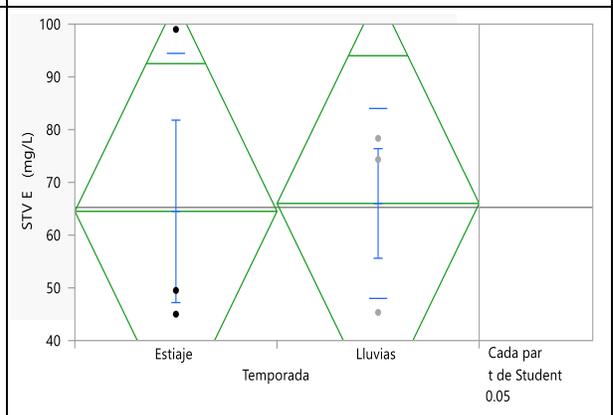
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



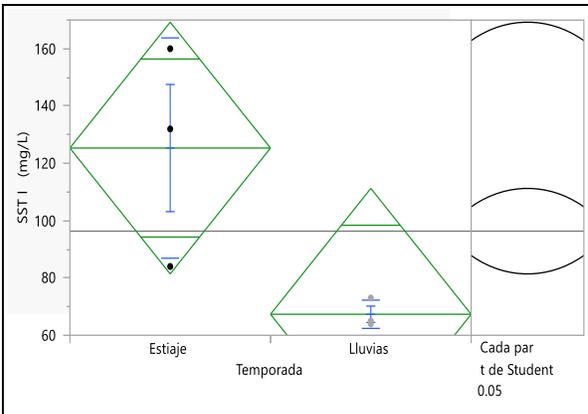
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



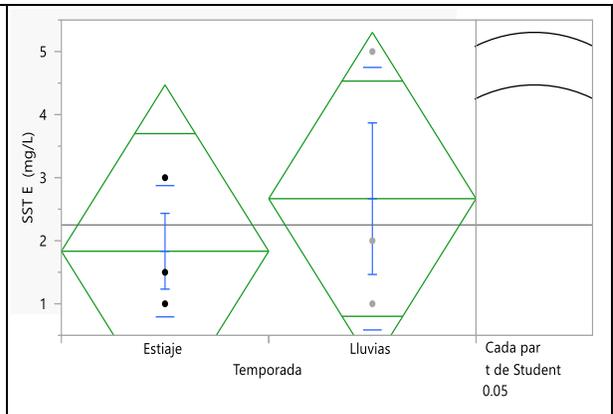
STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



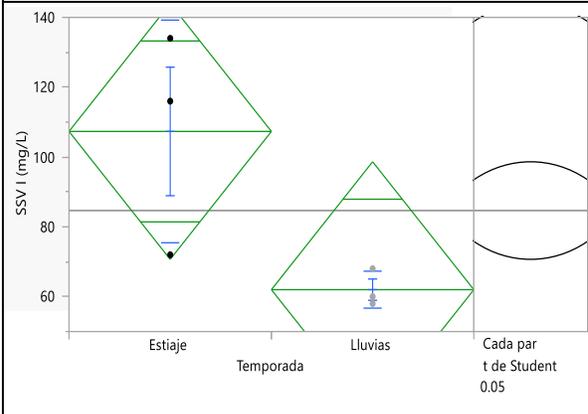
STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



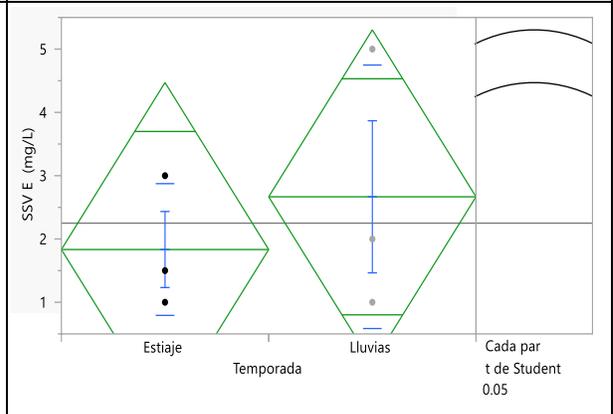
SST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



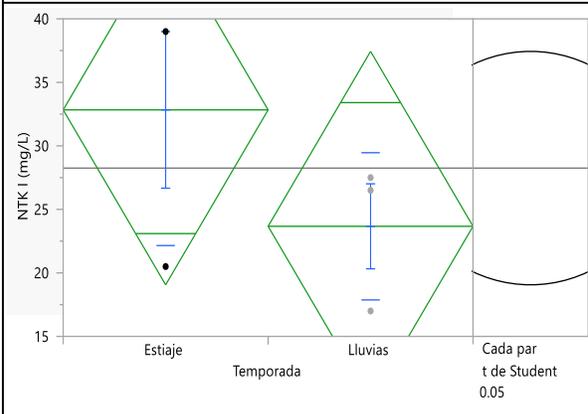
SST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



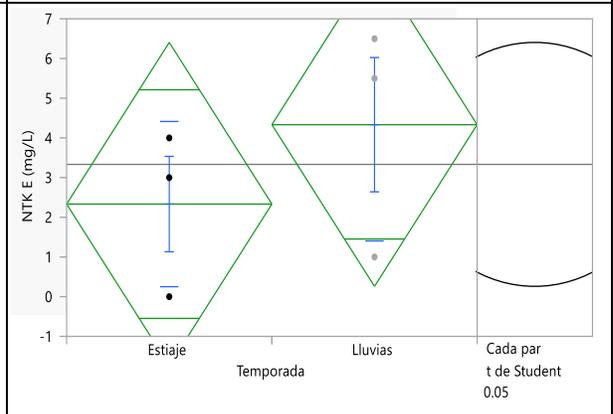
SSV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



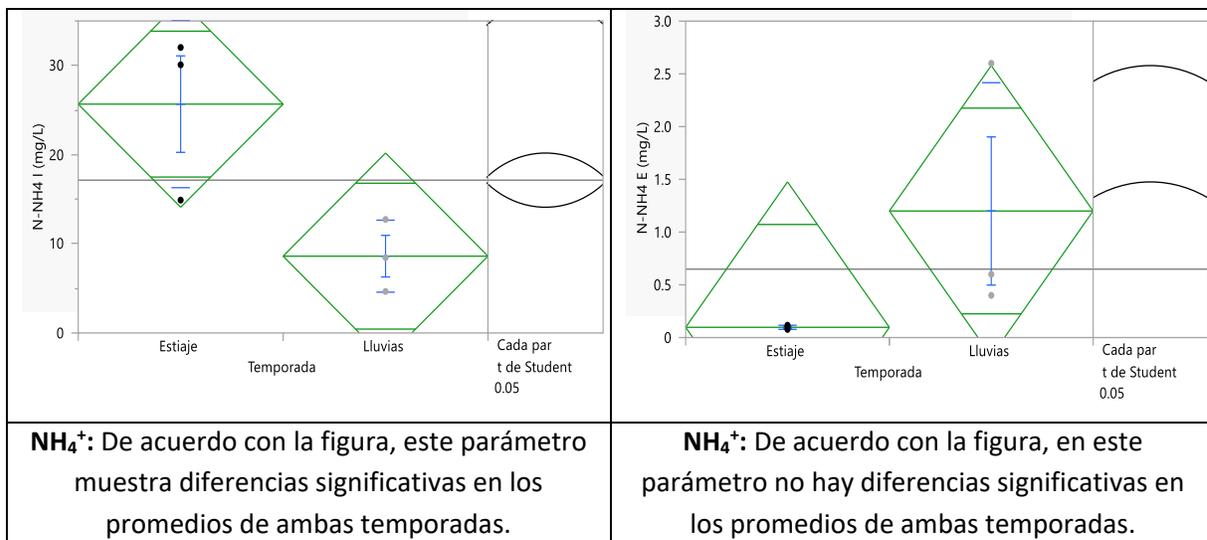
SSV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



NTK: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



NTK: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



Al analizar los parámetros que se muestra en la Figura 5.14 y de acuerdo con el análisis estadístico las diferencias significativas del agua influente solo se presentaron en los parámetros de pH, DQO soluble y el nitrógeno amoniacal. Para agua efluente de esta PTAR, se observa que la temporada no influye en la calidad del agua residual tratada, al presentarse una dispersión muy limitada de los datos y valores promedio muy similares; solo se presentó diferencia significativa en el pH. Aparentemente, el proceso más avanzado que tiene esta PTAR reduce las variaciones en la calidad del efluente. Adicionalmente, la planta alcanzó mayores remociones de los diversos contaminantes medidos. En ambos casos, los módulos de membranas sumergidas juegan un papel preponderante y aseguran un adecuado desempeño.

5.3.4. PTAR Santa Fe

Los resultados promedio de la caracterización para la temporada de lluvias y de estiaje para la planta de tratamiento Santa Fe se presentan en la Tabla 5.15, junto con los valores de remoción alcanzados.

En las Figuras 5.15 y 5.16 se presentan parámetros seleccionados como representativos para el influente y efluente, respectivamente. En cada figura se hace una comparación entre los valores obtenidos en cada temporada estacional, mostrando los valores promedio y el intervalo que marca su desviación estándar (Anexo A1 y A2).

Tabla 5.15. Caracterización de agua influente y efluente para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Santa Fe y eficiencias de remoción

SANTA FE							
Parámetro	Lluvias		% Remoción	Estiaje		% Remoción	
	Influente	Efluente		Influente	Efluente		
pH	7.43	6.16	-	7.17	6.00	91.95	
Alc	mgCaCO ₃ /L	113.00	5.00	95.58	145.00	11.67	94.90
DQOt	mg/L	295.83	15.67	94.70	428.00	21.83	89.71
DQOs	mg/L	137.00	11.00	91.97	163.50	16.83	ND
DBO5t	mg/L	ND	ND	ND	224.64	78.12	ND
DBO5s	mg/L	ND	ND	ND	85.44	64.28	94.01
COTT*	mg/L	98.67	8.12	91.77	142.67	8.55	84.59
COTs*	mg/L	45.67	7.91	82.68	54.50	8.40	23.49
ST	mg/L	475.44	456.56	3.97	553.33	423.33	54.34
STV	mg/L	195.11	110.56	43.33	292.00	133.33	-10.97
STF	mg/L	280.33	346.00	-23.43	261.33	290.00	98.21
SST	mg/L	94.33	4.33	95.41	186.00	3.33	97.95
SSV	mg/L	82.33	3.33	95.96	162.67	3.33	100.00
SSF	mg/L	12.00	1.00	91.67	23.33	0.00	-14.34
SDT	mg/L	381.11	452.22	-18.66	367.33	420.00	-0.52
SDV	mg/L	112.78	107.22	4.93	129.33	130.00	-21.85
SDF	mg/L	268.33	345.00	-28.57	238.00	290.00	100.00
Surfactantes	mg/L	4.17	0.46	88.97	3.44	0.00	15.76
PT	mg/L	2.47	2.43	1.62	4.25	3.58	16.11
PO ₄ ³⁻	mg/L	7.47	7.50	-0.40	12.97	10.88	39.42
NTK	mg/L	44.67	26.17	41.41	52.00	31.50	-44.20
N-Norg	mg/L	9.44	26.17	-177.22	21.65	31.22	99.08
N-NH ₄ ⁺	mg/L	35.22	0.53	98.50	30.35	0.28	91.95
N-NO ₃ ⁻	mg/L	3.52	0.00	100.00	3.69	6.25	-69.38
N-NO ₂ ⁻	mg/L	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	100.00
Colifecales	NMP/100mL	ND	ND	ND	3.38E+07	350.00	100.00
ColifTotales	NMP/100mL	1.12E+07	256.49	100.00	ND	ND	ND
Huevos de Helminto	HH/L	0.67	0.00	100.00	0.93	0.00	100.00
Conductividad	µs/cm	696.19	544.39	-	808.94	629.89	-
Temperatura	°C	19.44	19.50	-	19.91	19.44	-

ND: No determinado

Los promedios de dos parámetros importantes en el influente como la DQO total (428 mg/L) y la DQO soluble (163.50 mg/L) de la temporada de estiaje son superiores a los correspondientes de la temporada de lluvias: DQO total (295.83 mg/L) y DQO soluble (137 mg/L). En esta planta, el rango de la desviación estándar muestra diferencias notables entre lluvias y estiaje para la DQO total, STV, SST y SSV como se puede observar la Figura 5.15.

Para la temporada de lluvias, la Figura 5.15 muestra que algunos parámetros (DQO total y soluble, ST, STV) en el influente presentaron una mayor dispersión de datos en comparación con la temporada de estiaje. Así mismo, la temporada de estiaje presenta mayores concentraciones promedio en cada uno de los parámetros evaluados

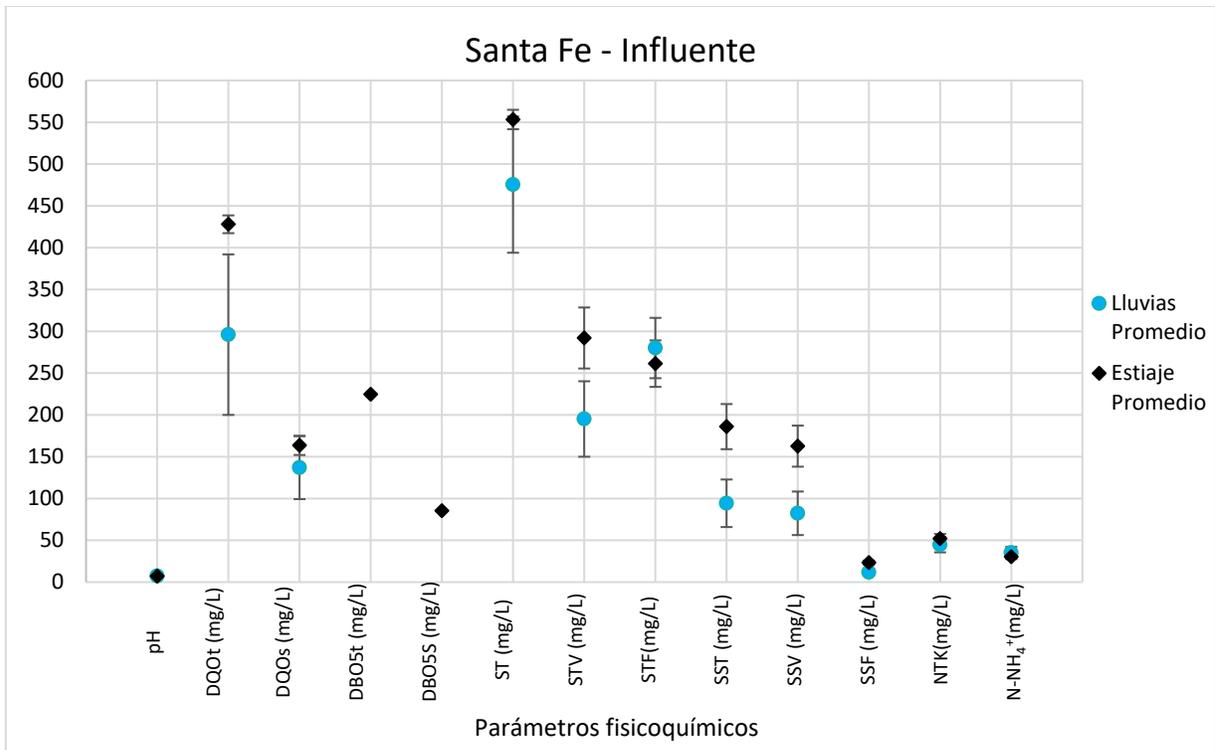


Figura 5.15. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua influyente de la PTAR Santa Fe para ambas temporadas (lluvia y estiaje).

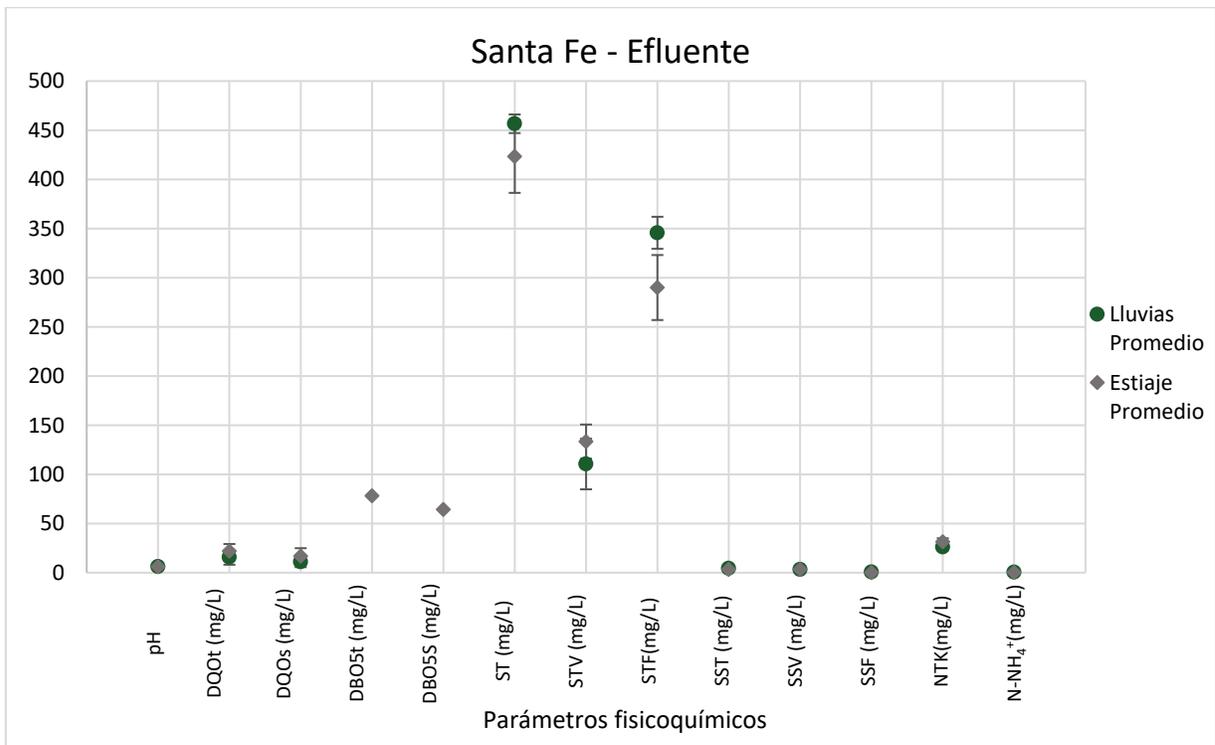
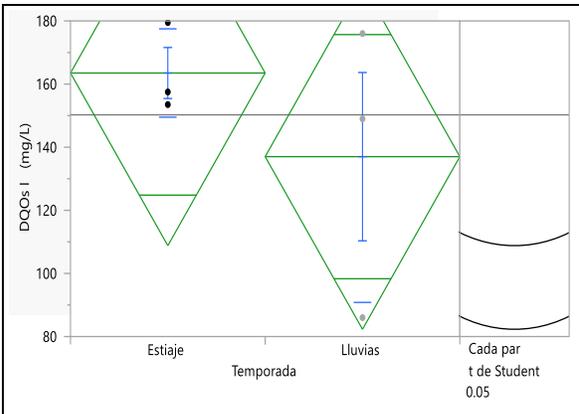


Figura 5.16. Datos promedio y desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Santa Fe para ambas temporadas (lluvia y estiaje).

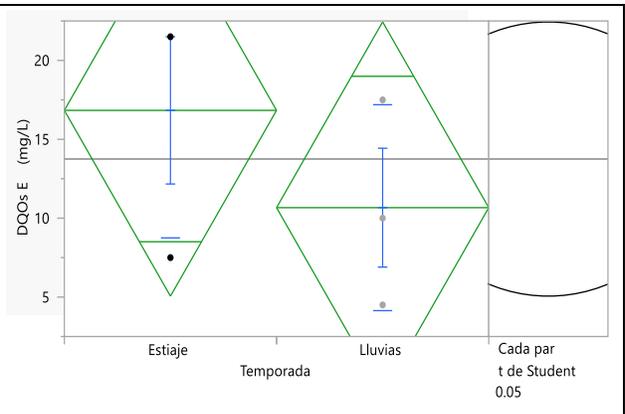
Para identificar las diferencias significativas entre los parametros relevantes en especial la DQO total y soluble, que se graficaron en las Figuras 5.15 y 5.16 de esta PTAR, se realizo una prueba de t de Student los resultados se muestran en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Comparación del agua influente y efluente de la PTAR Santa Fe para ambas temporadas (Lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico t de Student.

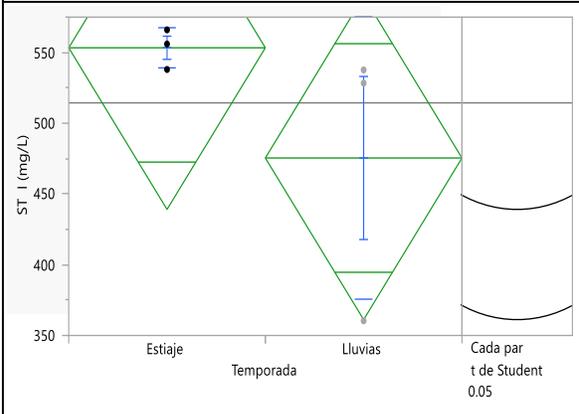
SANTA FE			
Influente	Efluente		
<p>pH: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>pH: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>		
<p>DQOt: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>DQOt: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>		



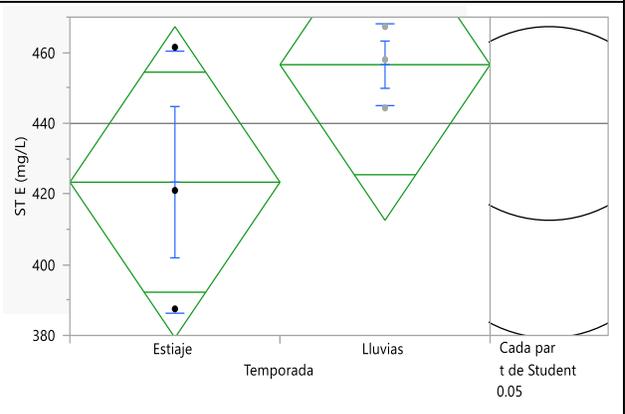
DQOs: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



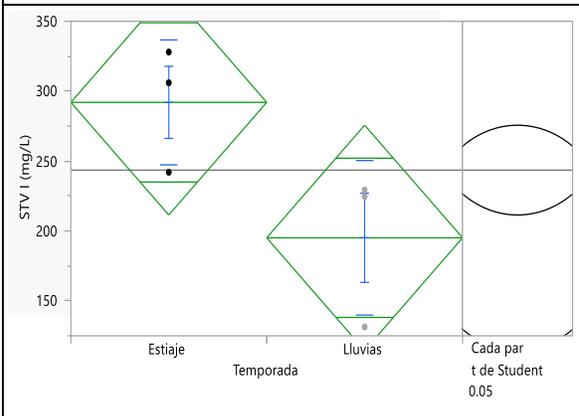
DQOs: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



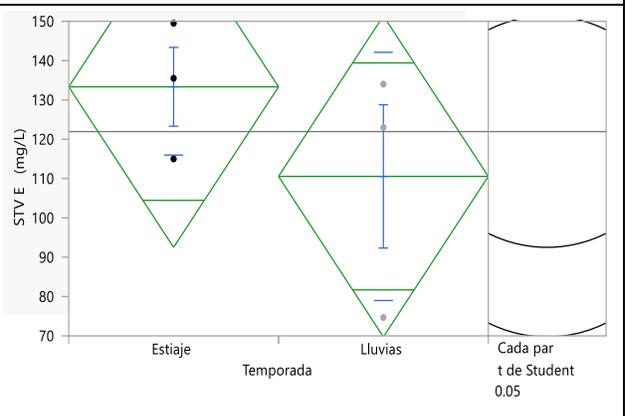
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



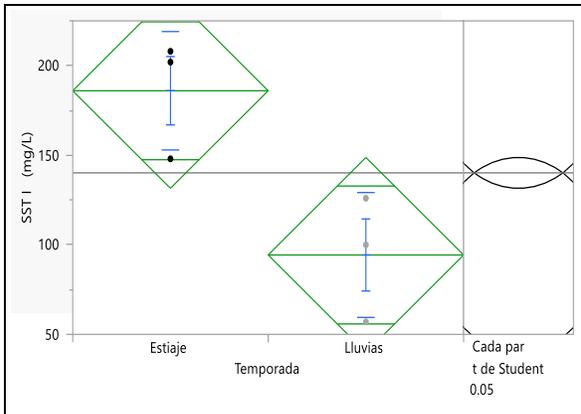
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



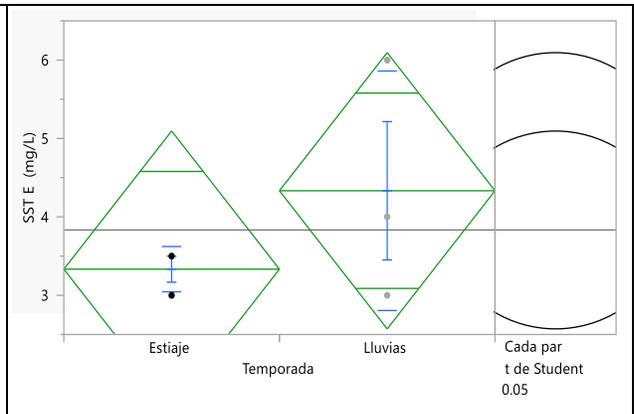
STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



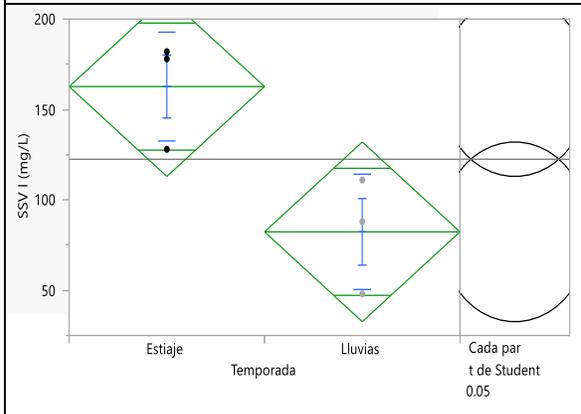
STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



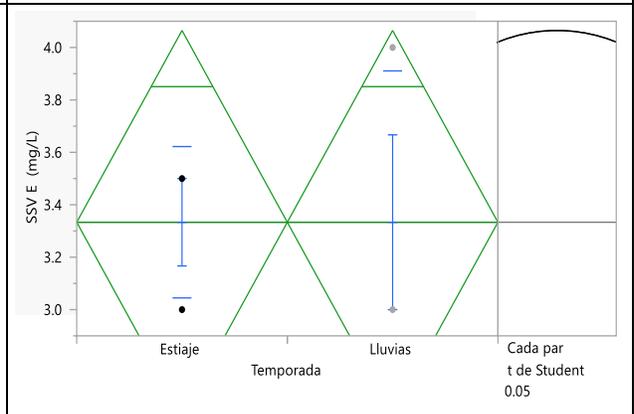
SST: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



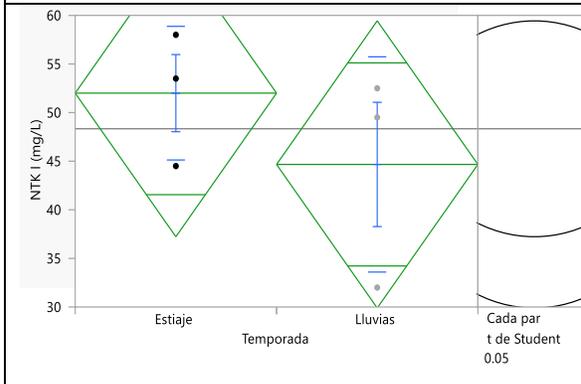
SST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



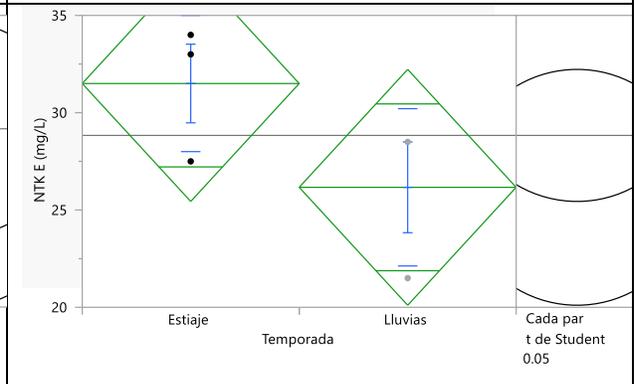
SSV: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



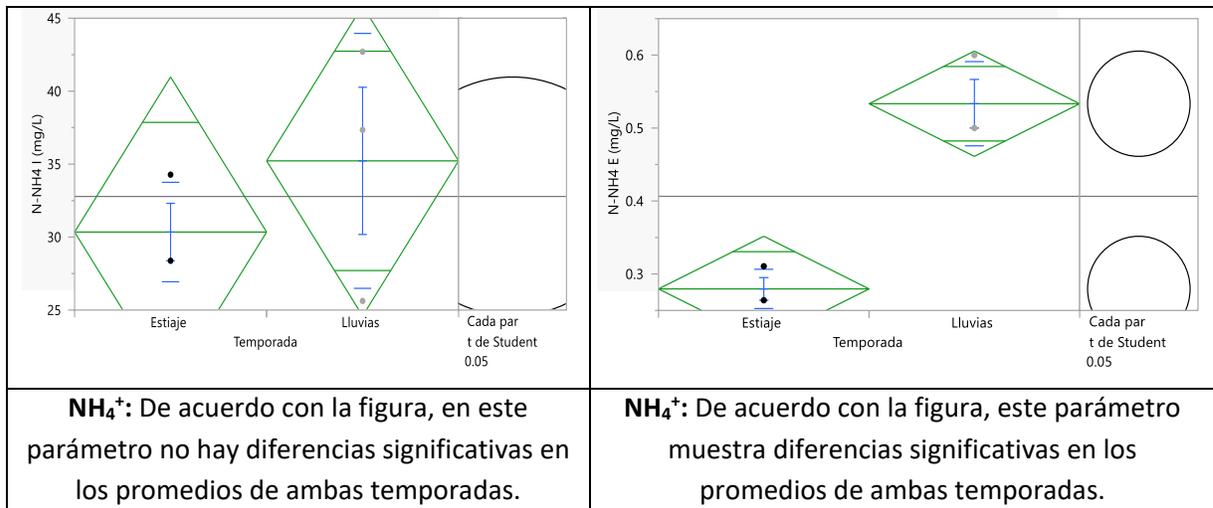
SSV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



NTK: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



NTK: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



Los parámetros graficados en la Figura 5.16 y de acuerdo con los análisis estadísticos realizados para el efluente de PTAR Santa Fe en ambas estaciones muestran que las variaciones en el agua influente debida a los periodos de lluvia y de estiaje no resultan en diferencias significativas en la salida. En el efluente solo se presentó una diferencia en el caso del nitrógeno amoniacal. Nuevamente, el proceso de tratamiento amortigua los cambios de concentración en la entrada, produciendo una calidad de agua tratada prácticamente constante.

Con el análisis de los datos de ambas temporadas estacionales, se puede concluir que la planta está cumpliendo con la calidad de descarga.

5.3.5. PTAR Ecoducto

La planta de tratamiento Ecoducto es una instalación de escala pequeña, con capacidad para tratar solo 30 m³/d, por lo que puede considerarse una planta demostrativa. Cuenta con dos procesos de tratamiento en serie, como ya ha sido descrito en el capítulo 4. El proceso comprende cinco biodigestores en serie, seguidos de un humedal artificial. La Tabla 5.17 presenta los resultados promedio de influente, efluente intermedio (efluente B) y efluente final, para ambas temporadas de muestreo, así como la remoción alcanzada por el sistema completo. Como en el resto de la PTAR aquí estudiadas, se promediaron los tres datos obtenidos por semana de muestreo, una en lluvias y otra en estiaje.

Por su parte, las Figuras 5.17 (influyente), 5.18 (efluente) y 5.19 (efluente B) presentan los valores promedio de parámetros representativos, con el intervalo de \pm su desviación estándar, para ambas temporadas (Anexo A1 y A2).

Tabla 5.17. Caracterización de agua influente, efluente anaerobio y efluente final para la temporada de lluvia y estiaje de la PTAR Ecoducto y eficiencias de remoción.

PTAR ECODUCTO									
Parámetro	Lluvias			% Remoción	Estiaje			% Remoción	
	Influente	Efluente B.	Efluente		Influente	Efluente B.	Efluente		
pH	7.52	7.16	6.70	-	7.06	6.68	6.51	-	
Alc mgCaCO ₃ /L	163.67	168.33	-	4.69	158.33	219.17	180.00	-	
DQOt mg/L	308.00	111.67	60.00	80.52	396.17	210.00	50.00	87.38	
DQOs mg/L	155.50	93.00	42.67	72.56	206.00	168.83	41.83	79.69	
DBO5t mg/L	ND	ND	ND	ND	283.60	154.00	87.13	ND	
DBO5s mg/L	ND	ND	ND	ND	56.70	50.60	42.50	ND	
COTT* mg/L	102.67	37.22	14.13	86.24	132.06	70.00	13.54	89.75	
COTs* mg/L	51.83	17.89	13.81	73.36	68.67	56.28	12.14	82.32	
ST mg/L	532.65	430.89	444.22	16.60	583.80	465.00	451.00	22.75	
STV mg/L	229.17	167.67	129.56	43.47	291.13	179.67	167.00	42.64	
STF mg/L	303.48	263.22	314.67	-3.69	292.67	285.33	284.00	2.96	
SST mg/L	93.21	17.00	13.67	85.33	168.47	31.67	15.67	90.70	
SSV mg/L	79.73	16.00	12.33	84.54	139.80	29.67	13.00	90.70	
SSF mg/L	13.48	1.00	1.34	90.06	28.67	2.00	2.67	90.69	
SDT mg/L	439.44	413.89	430.56	2.02	415.33	433.33	435.33	-4.82	
SDV mg/L	149.44	151.67	117.22	21.56	151.33	150.00	154.00	-1.76	
SDF mg/L	290.00	262.22	313.33	-8.04	264.00	283.33	281.33	-6.56	
Surfactantes mg/L	5.08	4.21	0.74	85.43	3.75	0.28	0.00	100.00	
PT mg/L	3.77	3.23	0.25	93.37	4.37	4.03	3.10	29.06	
PO ₄ ³⁻ mg/L	11.55	9.90	0.73	93.68	13.82	12.33	9.53	31.04	
NTK mg/L	56.83	8.58	8.17	85.62	52.33	50.50	18.17	65.28	
N-Norg mg/L	22.32	-24.54	8.17	63.40	15.05	9.84	5.48	63.59	
N-NH ₄ ⁺ mg/L	34.51	33.13	3.57	89.66	37.28	40.66	12.68	65.99	
N-NO ₃ ⁻ mg/L	1.76	0.59	0.00	100.00	3.26	3.81	1.53	53.07	
N-NO ₂ ⁻ mg/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.36	-	
Colifecales NMP/100m L	ND	ND	ND	ND	1.93E+06	7.83E+04	65.00	100.00	
ColifTotales NMP/100m L	3.77E+07	8.60E+05	374.58	100.00	ND	ND	ND	ND	
Huevos de Helminto HH/L	1.07	0.00	0.00	100.00	2.50	0.70	0.00	100.00	
Conductividad μs/cm	725.13	718.87	604.27	-	813.07	846.67	749.93	-	
Temperatura °C	22.35	20.16	19.23	-	22.46	22.61	20.87	-	

ND: No determinado

Los promedios de dos parámetros importantes en el influente como la DQO total (396.17 mg/L) y la DQO soluble (206 mg/L) de la temporada de estiaje son superiores a los correspondientes de la temporada de lluvias: DQO total (308 mg/L) y DQO soluble (155.50 mg/L). En esta planta, el rango de la desviación estándar muestra diferencias entre lluvias y estiaje para la DQO total, DQO soluble, STV, SST y SSV como se puede observar la Figura 5.17. En general, se presenta una limitada dispersión de los datos para cada parámetro y para ambas temporadas. Así mismo, la temporada de estiaje presenta mayores concentraciones promedio en cada uno de los parámetros evaluados, salvo en los STF y NTK.

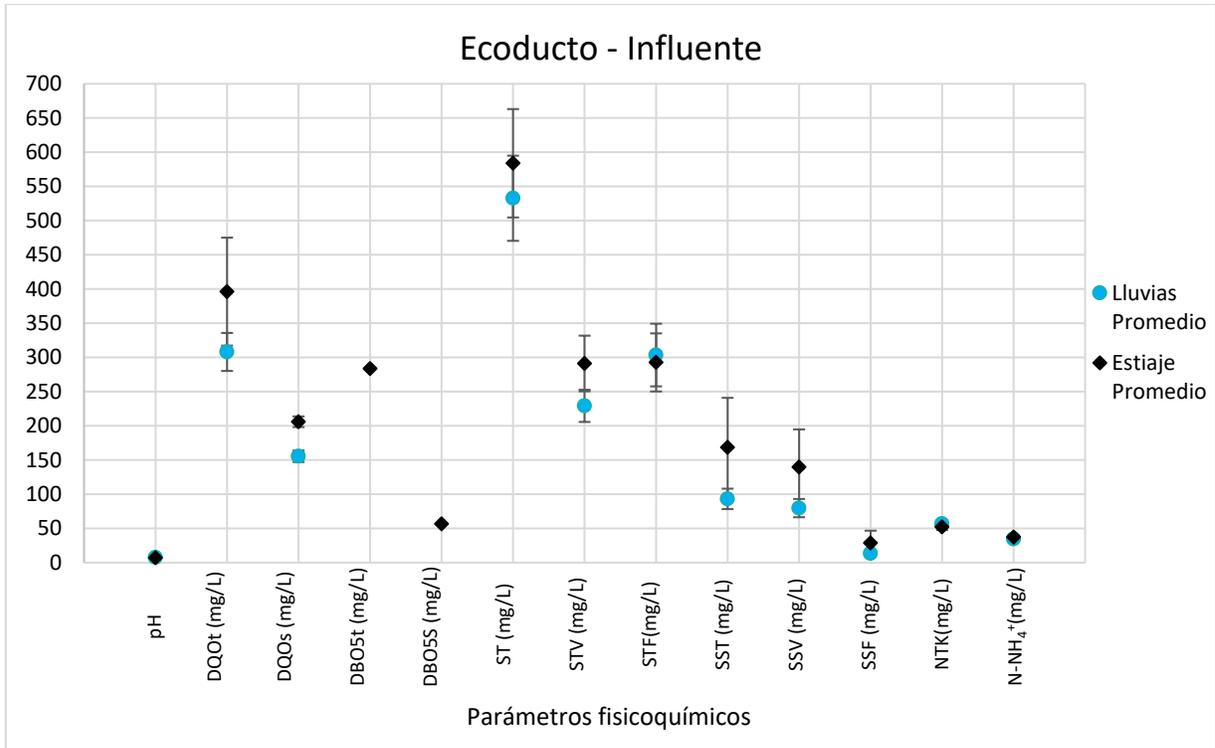


Figura 5.17. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua influyente de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvia y estiaje).

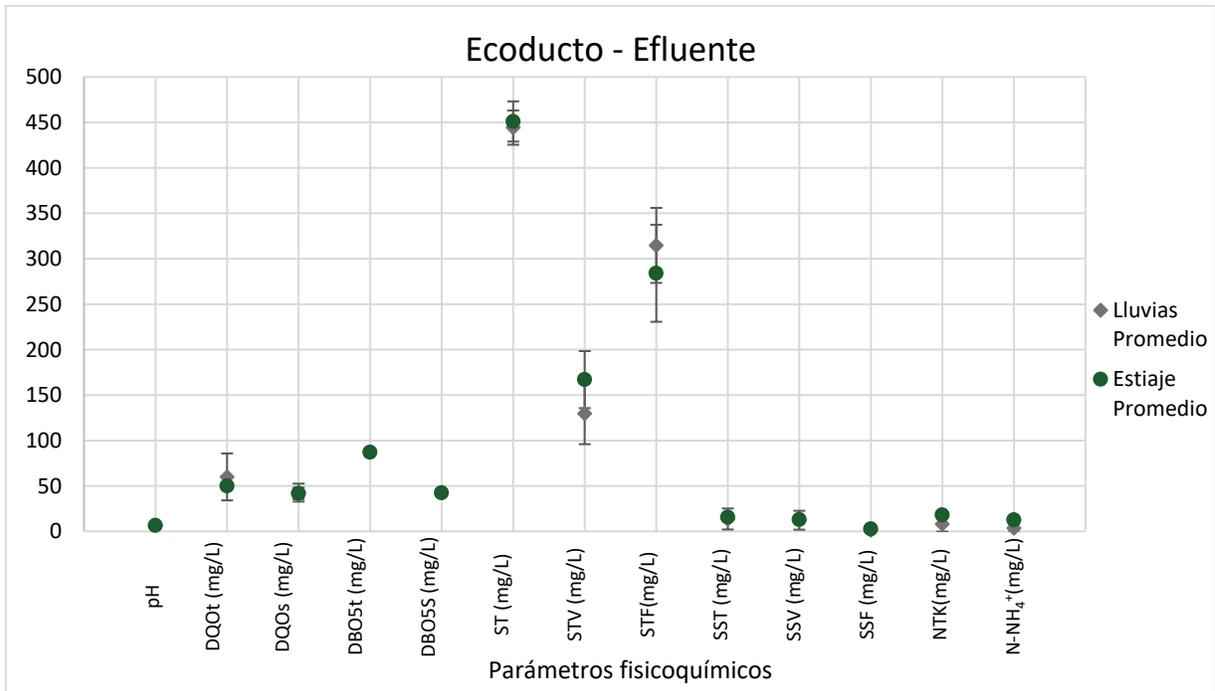


Figura 5.18. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua efluente de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvia y estiaje).

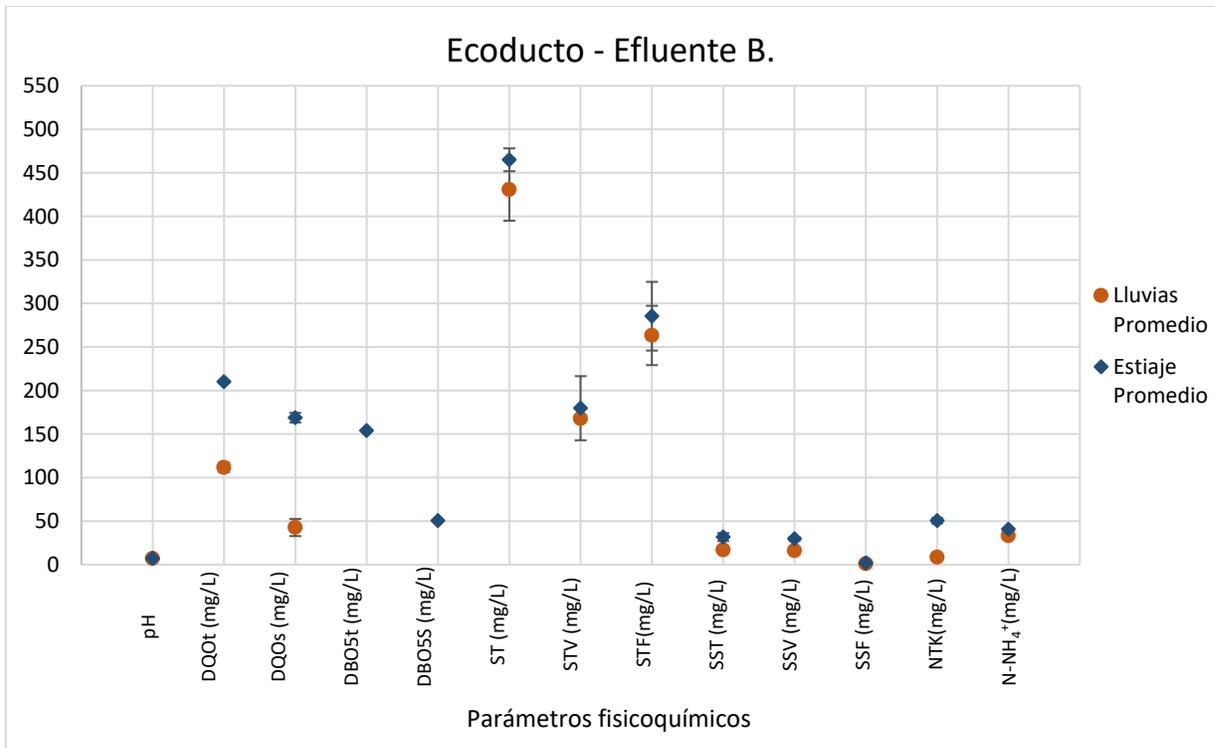
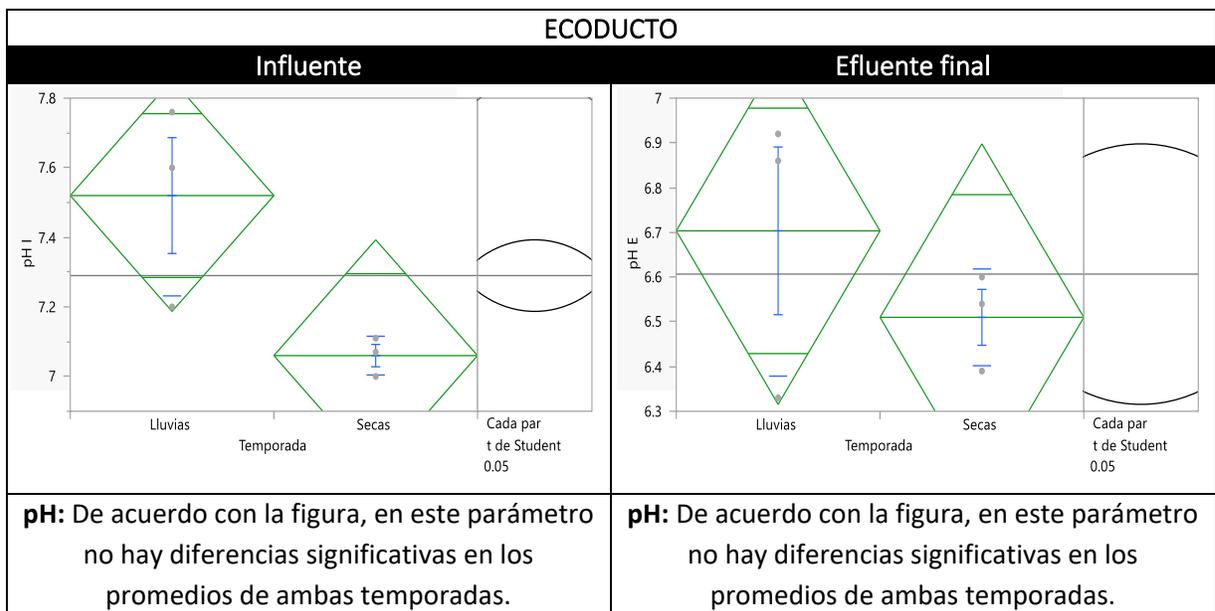
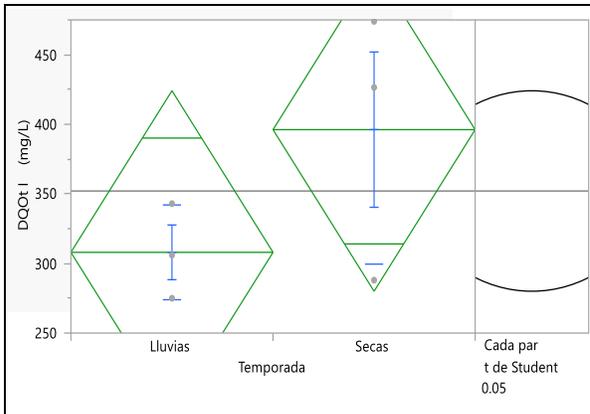


Figura 5.19. Datos promedio y su desviación estándar de la caracterización de agua efluente de biodigestores de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvia y estiaje).

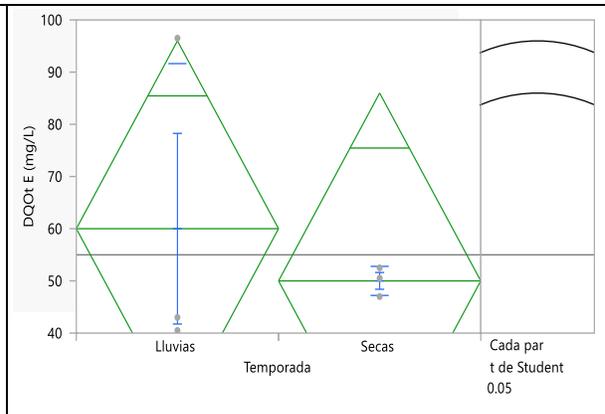
Para identificar las diferencias significativas entre los parámetros relevantes graficados en las Figuras 5.16, 5.18 y 5.19 de esta PTAR, se realizó una prueba de t de Student los resultados se muestran en la Tabla 5.18 y la Tabla 5.19.

Tabla 5.18. Comparación del agua influente y efluente de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico t de Student.

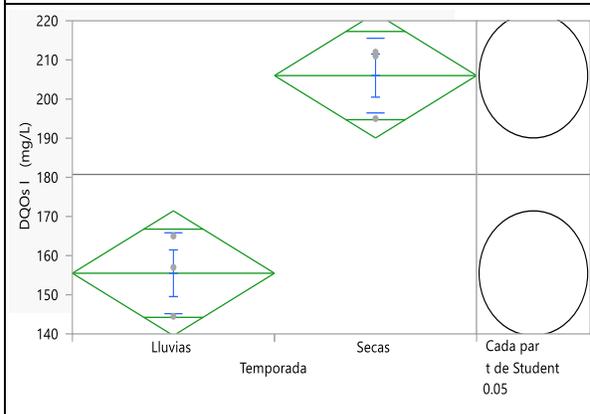




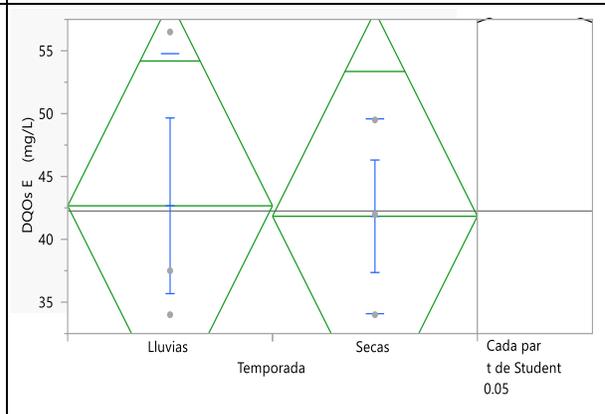
DQOt: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



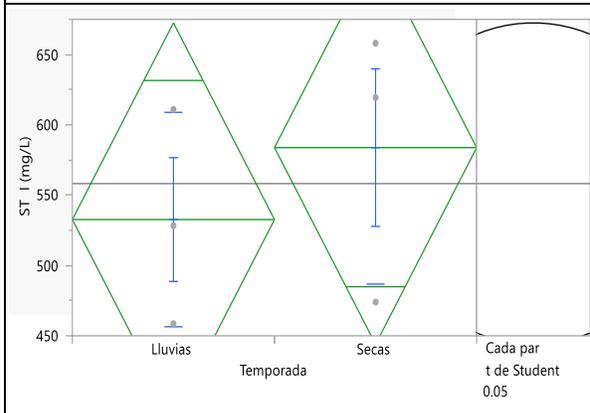
DQOt: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



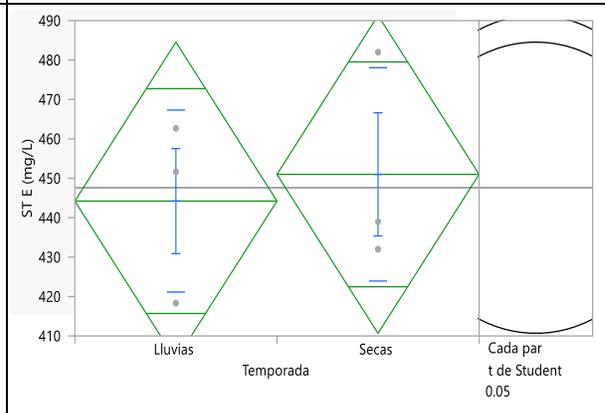
DQOs: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



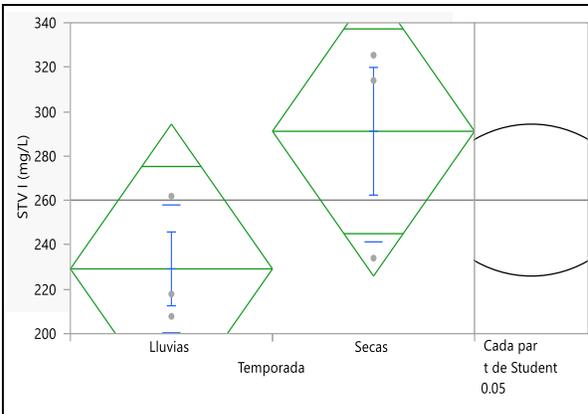
DQOs: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



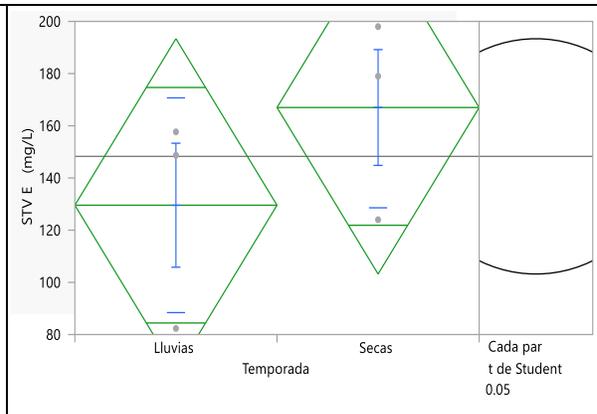
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



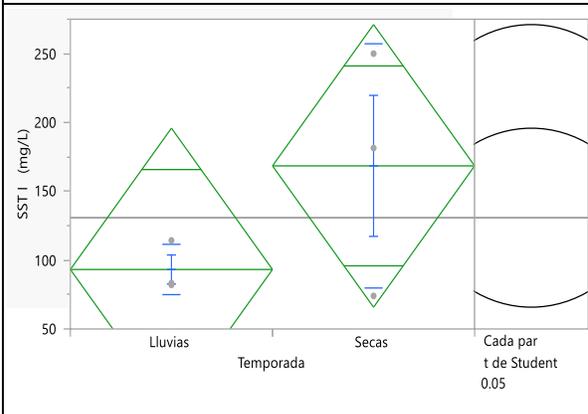
ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



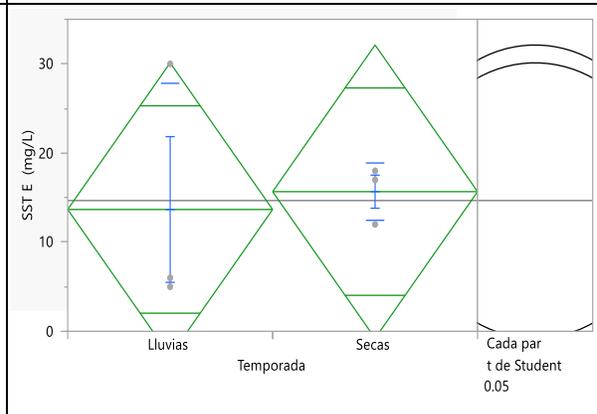
STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



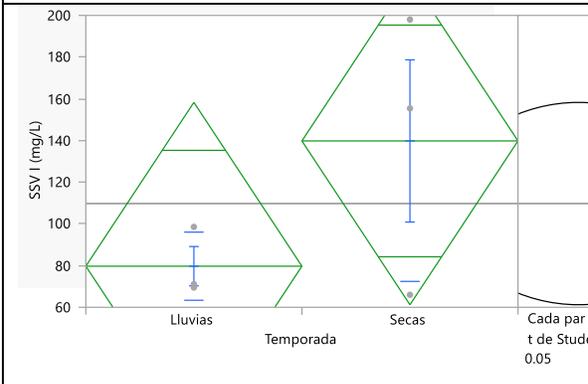
STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



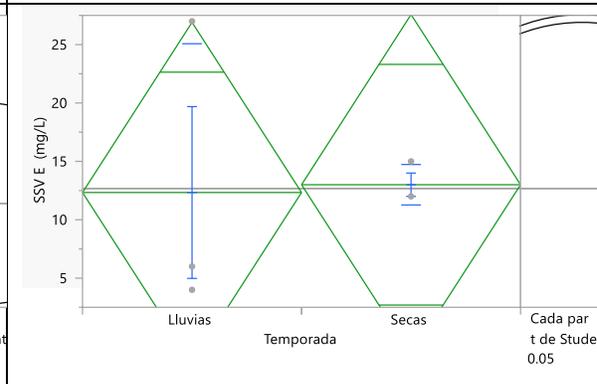
SST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



SST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



SSV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.



SSV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.

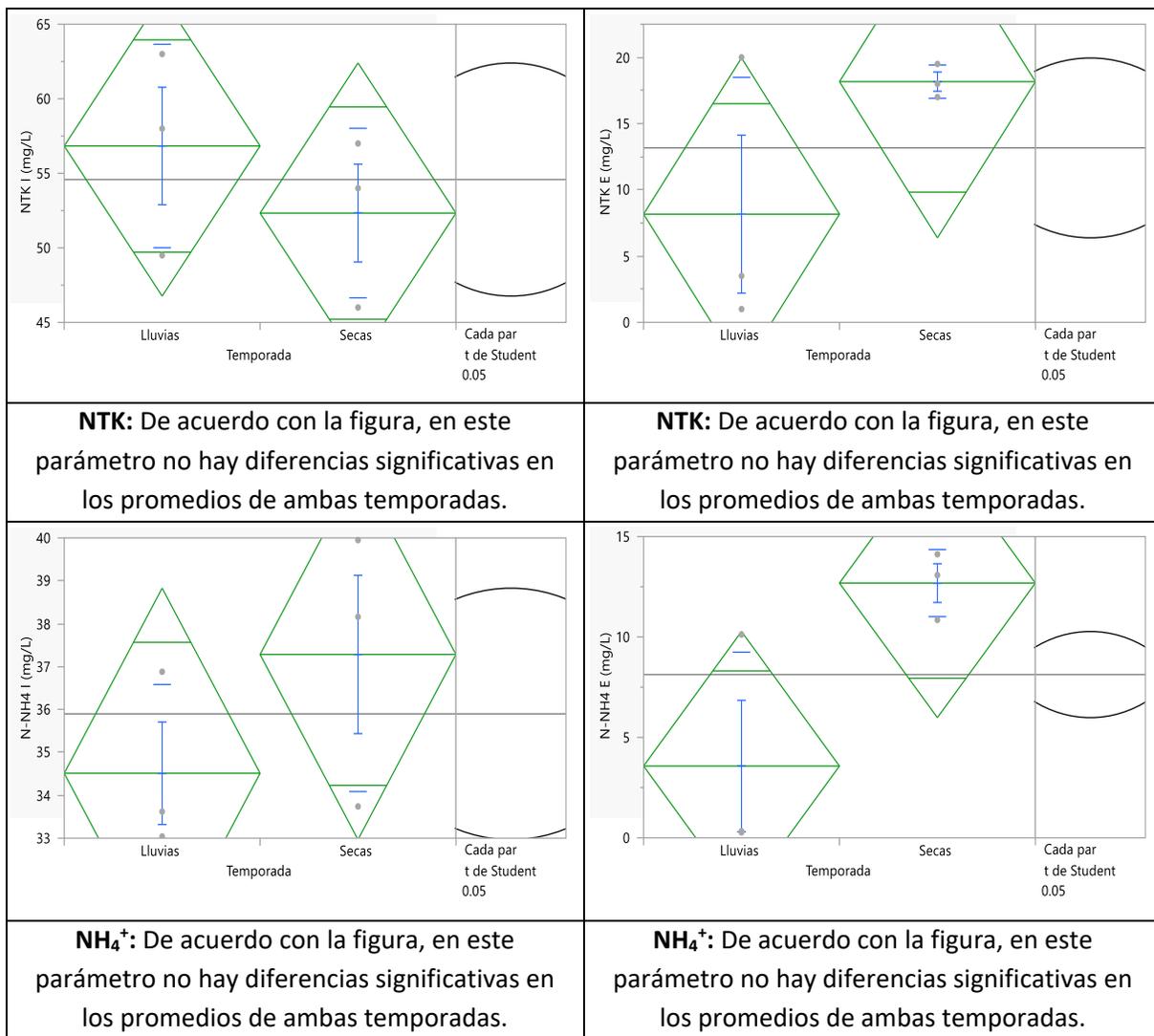
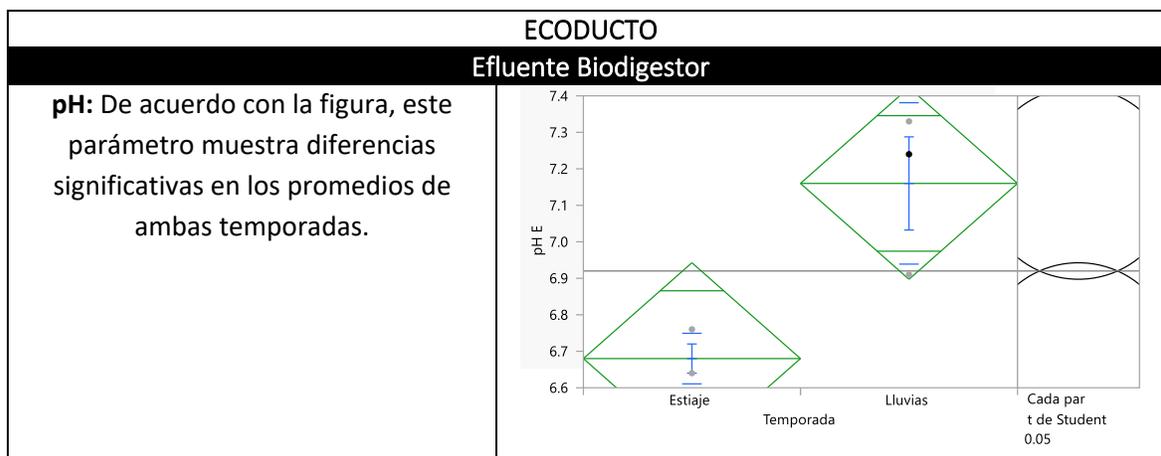


Tabla 5.19. Características del agua efluente de biodigestores de la PTAR Ecoducto para ambas temporadas (lluvias y estiaje), mediante el análisis estadístico t de Student.



<p>DQOt: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>DQOt E (mg/L)</p> <p>Estiaje Temporada Lluvias</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>
<p>DQOs: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>DQOs E (mg/L)</p> <p>Estiaje Temporada Lluvias</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>
<p>ST: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>ST E (mg/L)</p> <p>Estiaje Temporada Lluvias</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>
<p>STV: De acuerdo con la figura, en este parámetro no hay diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>STV E (mg/L)</p> <p>Estiaje Temporada Lluvias</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>

<p>SST: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>SST E (mg/L)</p> <p>Temporada</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>
<p>SSV: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>SSV E (mg/L)</p> <p>Temporada</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>
<p>NTK: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>NTK E (mg/L)</p> <p>Temporada</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>
<p>NH₄⁺: De acuerdo con la figura, este parámetro muestra diferencias significativas en los promedios de ambas temporadas.</p>	<p>N-NH₄ E (mg/L)</p> <p>Temporada</p> <p>Cada par t de Student 0.05</p>

Los parámetros graficados en la Figura 5.18 y de acuerdo con el análisis estadístico para el efluente final de la PTAR Ecoducto y en ambas estaciones, presentan muy limitadas variaciones. Al igual que en las otras PTAR estudiadas en este trabajo, las variaciones en el influente debidas a los periodos de lluvia y de estiaje no provocaron perturbaciones en la calidad de salida. Esto indica que el proceso de tratamiento amortigua los cambios de concentración en la entrada, produciendo una calidad de agua prácticamente constante.

En cuanto a las variaciones en el efluente del biodigestor (Figura 5.19) prácticamente todos los parámetros presentados mostraron diferencias significativas entre estiaje y lluvias (salvo ST y STV). En general, y con excepción del pH, los parámetros presentaron mayores valores en época de estiaje que en época de lluvias,

Con el análisis de los datos de ambas temporadas estacionales, se puede concluir que la planta está cumpliendo con la calidad de descarga.

En resumen, para este capítulo, de acuerdo con las figuras 5.11., 5.13., 5.15. y 5.17 correspondientes a cada PTAR, y de acuerdo con los resultados de la prueba de t de Student y ANOVA, los valores promedio del influente y su desviación estándar de los parámetros representativos (DQOt, DQOs, ST, STV, SST, SSV) indican que existe una diferencia significativa entre la temporada de lluvias y la de estiaje, con mayores concentraciones en esta última. Sin embargo, a pesar de esa diferencia, la calidad de los efluentes de cada una de las plantas de tratamiento no presentó diferencias significativas. La implicación práctica de lo anterior es que los procesos de tratamiento de las cuatro PTAR estudiadas pueden recibir un influente con variaciones en su concentración, pero producirán un efluente relativamente constante en sus características.

5.4. COMPARACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

En este subcapítulo se analizan los datos de remoción de parámetros fisicoquímicos seleccionados para cada PTAR estudiada y en ambas temporadas de muestreo. Para ello, se muestran los datos de remoción obtenidos con los datos históricos de SACMEX y los medios por el LIA-UNAM, para cada temporada, así como el promedio general respectivo.

Los datos correspondientes a la PTAR Cerro de la Estrella se presentan en la Tabla 5.20, los de Chapultepec en la Tabla 5.21, los de Santa Fe en la Tabla 5.22 y finalmente los de Ecoducto en la Tabla 5.23. Esta última tabla contiene, además de los datos obtenidos en este trabajo, los resultados de un solo dato obtenido por SACMEX. Esto debido a que SACMEX no realiza un monitoreo de esta planta, ya que su operación no está bajo su responsabilidad

Tabla 5.20. Comparación de la remoción de contaminantes, obtenida por SACMEX y el LIA-UNAM de la PTAR Cerro de la Estrella, para temporada de lluvias, estiaje y general.

Cerro de la Estrella	% REMOCIÓN					
Parámetro	Lluvias SACMEX	Lluvias LIA-UNAM	Estiaje SACMEX	Estiaje LIA-UNAM	General SACMEX	General LIA-UNAM
DQOt	84.07	77.25	84.80	95.14	84.44	86.20
DQOs	79.34	72.91	82.12	81.84	80.73	77.38
DBO5t	94.97	ND	96.56	65.36	95.77	65.36
DBO5s	49.91	ND	51.20	23.36	50.56	23.36
PT	15.82	49.43	41.29	81.91	28.56	65.67
N-Norg	73.90	25.70	77.65	3.16	75.78	14.43
N-NH ₄ ⁺	73.93	-27.17	75.99	85.91	74.96	29.37
Colif-f	99.96	ND	99.93	99.99	99.95	99.99

Tabla 5.21. Comparación de la remoción de contaminantes, obtenida por SACMEX y el LIA-UNAM de la PTAR Chapultepec, para temporada de lluvias, estiaje y general.

Chapultepec	% REMOCIÓN					
Parámetro	Lluvias SACMEX	Lluvias LIA-UNAM	Estiaje SACMEX	Estiaje LIA-UNAM	General SACMEX	General LIA-UNAM
DQOt	93.27	92.70	93.56	95.00	93.42	93.85
DQOs	88.97	89.73	90.53	92.70	89.75	91.22
DBO5t	98.11	ND	98.44	93.29	98.28	93.29
DBO5s	98.02	ND	98.15	91.39	98.09	91.39
PT	28.54	76.92	39.01	47.92	33.78	62.42
N-Norg	88.47	71.23	88.98	68.72	88.73	69.98
N-NH ₄ ⁺	90.46	86.08	88.34	99.61	89.40	92.85
Colif-f	99.98	100.00	99.96	ND	99.97	100.00

Tabla 5.22. Comparación de la remoción de contaminantes, obtenida por SACMEX y el LIA-UNAM de la PTAR Santa Fe, para temporada de lluvias, estiaje y general.

Santa Fe	% REMOCIÓN					
Parámetro	Lluvias SACMEX	Lluvias LIA-UNAM	Estiaje SACMEX	Estiaje LIA-UNAM	General SACMEX	General LIA-UNAM
DQOt	93.33	94.71	91.52	94.90	92.43	94.81
DQOs	86.92	91.97	87.48	89.71	87.20	90.84
DBO5t	98.05	ND	98.62	65.22	98.34	65.22
DBO5s	93.71	ND	95.02	24.77	94.37	24.77
PT	21.88	1.62	8.40	15.76	15.14	7.88
N-Norg	91.27	-	92.81	-	92.04	-
N-NH ₄ ⁺	89.65	98.50	94.39	99.08	92.02	98.79
Colif-f	99.98	ND	99.97	100.00	99.98	100.00

La PTAR Ecoducto no tiene antecedentes históricos de datos medidos por SACMEX, como ya ha sido mencionado. Se cuenta solo con datos de una muestra simple que se analizó en ese organismo.

Tabla 5.23. Remoción obtenida de la PTAR Ecoducto, obtenida en el LIA-UNAM para temporada de lluvias y estiaje.

Ecoducto	% REMOCIÓN			
	Lluvias LIA-UNAM	Estiaje LIA-UNAM	General SACMEX	General LIA-UNAM
DQOt	80.52	87.38	ND	83.95
DQOs	72.56	79.69	ND	76.13
DBO5t	ND	69.28	96.94	69.28
DBO5s	ND	25.04	98.53	25.04
PT	93.37	29.06	ND	61.22
N-Norg	63.4	63.59	ND	63.50
N-NH ₄ ⁺	89.66	65.99	94.56	77.83
Colif-f	ND	100.00	99.99	100.00

En la Tabla 5.24 se presenta el resumen de eficiencias de remoción para ambas temporadas y para las cuatro PTAR estudiadas, con base en los resultados del LIA-UNAM

Tabla 5.24. Comparación de la remoción de contaminantes con base en los datos generales del LIA-UNAM.

Parámetro	% REMOCIÓN			
	General C. Estrella LIA-UNAM	General Chapultepec LIA-UNAM	General Santa Fe LIA-UNAM	General Ecoducto LIA-UNAM
DQOt	93.85	93.85	94.81	83.95
DQOs	91.22	91.22	90.84	76.13
DBO5t	93.29	93.29	65.22	69.28
DBO5s	91.39	91.39	24.77	25.04
PT	62.42	62.42	7.88	61.22
N-Norg	69.98	69.98	-	63.50
N-NH ₄ ⁺	92.85	92.85	98.79	77.83
Colif-f	99.99	100.00	100.00	100.00

La Figura 5.20 muestra las eficiencias de remoción de los parámetros de DQO total y soluble, DBO total y soluble, fósforo total, nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal, donde se compara la temporada de lluvias y estiaje, para cada una de las PTAR, analizando las eficiencias de remoción de los parámetros con base en los datos de LIA UNAM (Tablas 5.20, 5.21, 5.22 y 5.24). Se percibe que las remociones no cambian significativamente (DQOt, DQOs, N-NH₄⁺) al mostrar una limitada influencia de la estacionalidad, aunque se observa, en algunos parámetros y no en todas las PTAR, ciertas diferencias. Se corrobora que en general las plantas funcionan en condiciones adecuadas, independientemente de la temporada, ya se de lluvias o estiaje.

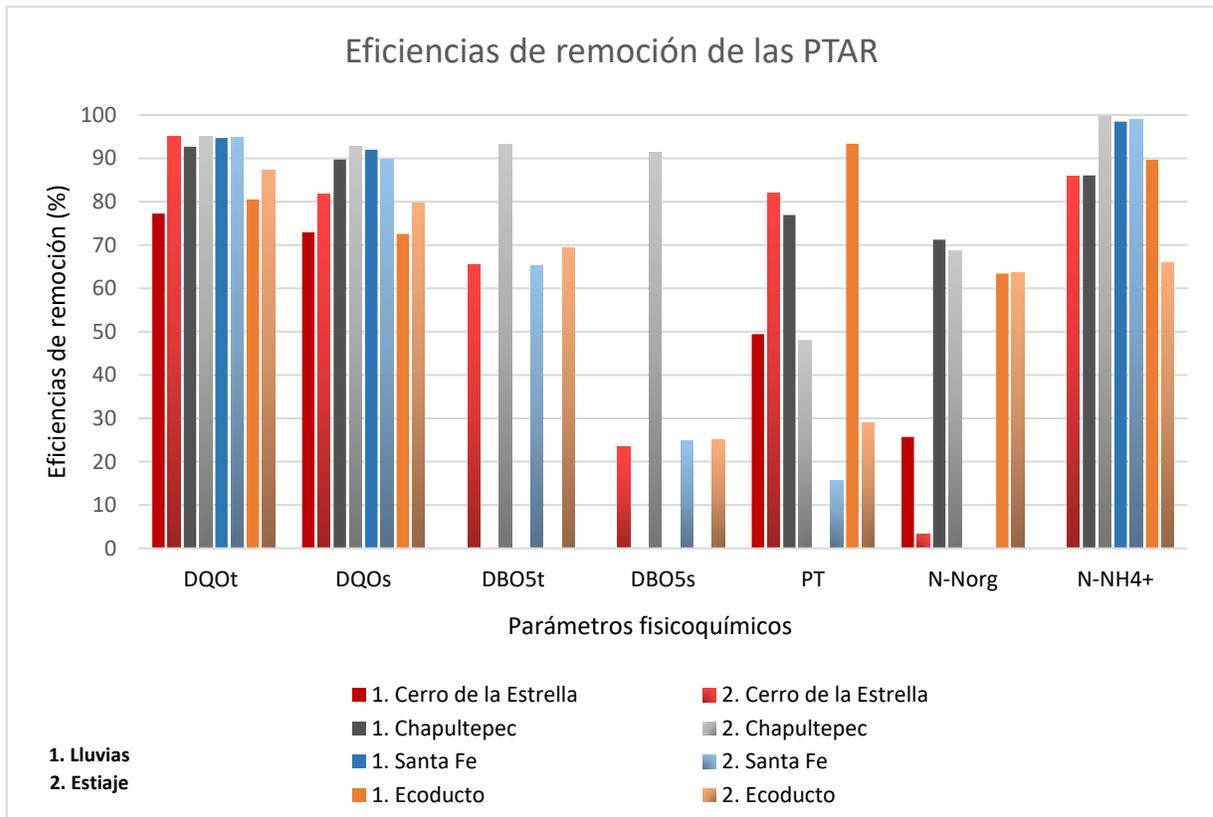


Figura 5.20. Eficiencias de remoción de las PTAR estudiadas en el LIA-UNAM, en temporada de lluvias y estiaje.

En la Figura 5.21., se comparan las eficiencias de remoción obtenidas en este proyecto con las calculadas con los datos históricos de SACMEX. En este caso, los valores de la DQO total y soluble no varían significativamente. No es el caso de los demás parámetros, que muestran diferencias entre los datos de SACMEX y los de LIA-UNAM, a excepción de $N-NH_4^+$ para Chapultepec y Santa Fe. En particular, el fósforo total presentó los resultados más diferentes al comparar ambos conjuntos de datos.

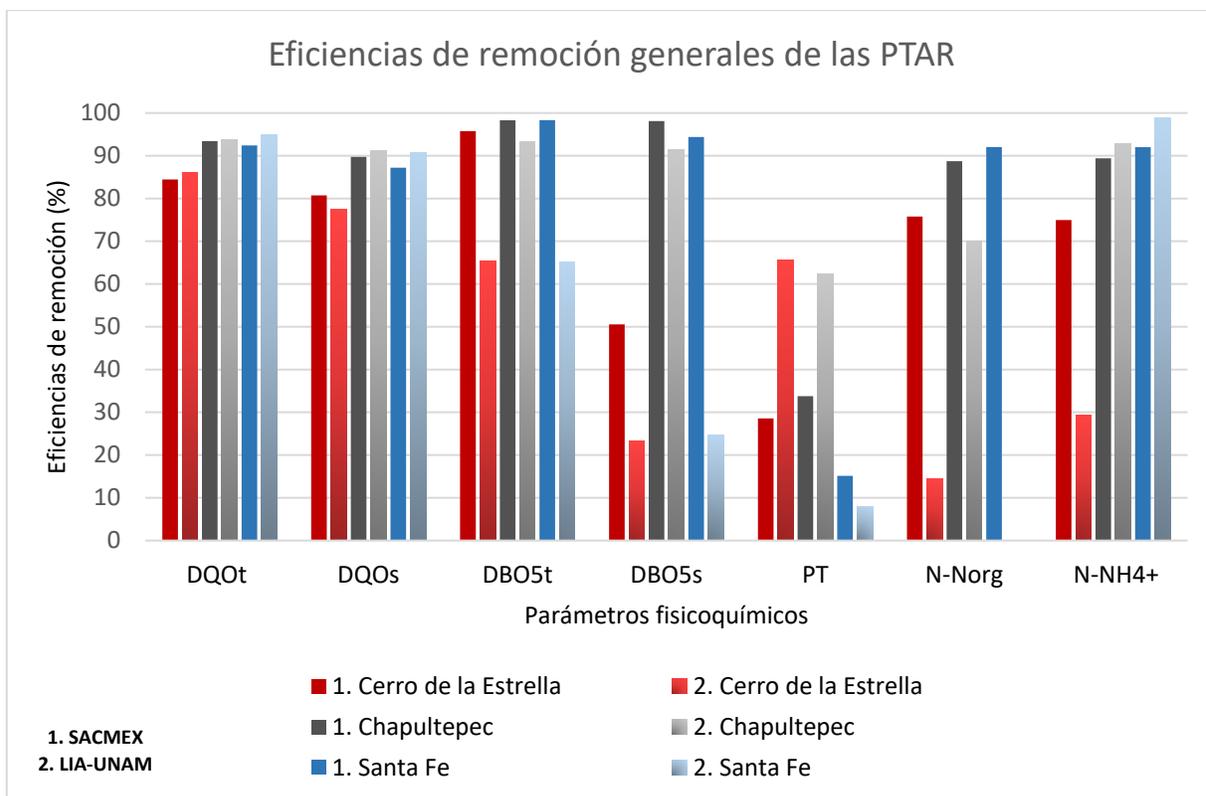


Figura 5.21. Eficiencias de remoción (promedio general) de las PTAR estudiadas en el LIA-UNAM y SACMEX.

Cabe destacar que, para el cálculo de los promedios y eficiencias obtenidos para SACMEX, los datos eran de muestras puntuales tomados a largo de un periodo de tiempo de diez años, en temporada de lluvias y secas (excepto para Chapultepec, en su efluente, que su proceso modernizado opera desde el año 2018). Este procedimiento difiere del aplicado en este trabajo, donde se tomaron tres muestras (compuestas en 24 horas) por semana de cada PTAR, de ambas temporadas.

Puede observarse que las plantas cumplen adecuadamente con la calidad deseada especificada por la NOM-003-SEMARNAT-1997.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Los parámetros evaluados en temporada de lluvias y estiaje, considerando el conjunto de datos de los influentes de las cuatro PTAR dan como resultado que los parámetros pH, DQO total y soluble, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos totales y volátiles, muestran diferencias significativas en ambas temporadas de acuerdo con la prueba t de Student, con mayor concentración promedio en estiaje. En forma de conjunto para las cuatro PTAR, la estacionalidad si influye en la carga contaminante del agua residual al contar la ciudad con drenaje combinado en temporada de lluvias. Por ejemplo, la DQO total en temporada de lluvias, considerando la totalidad de los datos de las cuatro PTAR tuvo una concentración de 237.88 ± 91.16 mg/L, en comparación con el valor en estiaje (374.08 ± 88.72 mg/L).

En las caracterizaciones individuales (por PTAR), la aplicación de la prueba de Tukey-Kramer para los datos de influente indican que entre las cuatro PTAR, la ocurrencia de diferencias significativas entre sus parámetros de calidad influente se reduce en la temporada de estiaje, si se compara con la que se presenta en lluvias. En esta última temporada, solo se presentaron diferencias estadísticamente significativas en pH, temperatura y NTK para alguna de las PTAR.

En cuanto a los efluentes, mediante los análisis de ANOVA y t de Student en los parámetros seleccionados como relevantes, no se identificó una variación en la calidad del efluente tratado en las dos temporadas, ya que no se mostraron diferencias significativas en ninguna de las PTAR, lo que demuestra que los procesos de tratamiento en las cuatro plantas pudieron acomodar las variaciones en el influente, no reflejándolas en la salida, la cual presentó valores semejantes en ambas temporadas.

Al comparar los datos de este trabajo con los históricos (muestreo puntual) obtenidos durante 10 años por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), se encuentra que los datos históricos muestran en general mayores valores promedio en varios parámetros de los cuatro influentes. Si bien debido a la dispersión de los datos (amplia desviación estándar) no se identifican diferencias estadísticamente significativas, algunos parámetros muestran valores promedio puntuales claramente diferentes.

Al evaluar los datos obtenidos para agua efluente de cada una de las PTAR estudiadas, se concluye que los resultados entran dentro del rango especificado por las normas de aguas residuales de México, tal como la NOM- 003- SEMARNAT- 1997. Aunque los influentes, contienen mayor concentración de materia orgánica e inorgánica durante la época de estiaje, las plantas de tratamiento estudiadas no se vieron afectadas en el proceso de tratamiento, ya la calidad del efluente al final de cada PTAR, no se vio afectada por la estacionalidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmed, S.F., Mafijur, M., *et al.* (2021). Recent developments in physical, biological, chemical and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>
- APHA. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22rd Edition. American Public Health Association. 874pp.
- Asfak, P., Ambika, A., *et al.* (2021). Physico-chemical and biological treatment strategies for converting municipal wastewater and its residue to resources. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130881>
- Ashish, S., Ashok, K., *et al.* (2021). Treatment of saline wastewater using physicochemical, biological, and efficiencies and performance enhancement. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105775>
- CENAPRED. (2019). Centro Nacional de Prevención de Desastres. Drenaje de CDMX, infraestructura con historia. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/conocemas-drenaje-de-cdmx-infraestructura-con-historia>
- CONAGUA. (2019). Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- DGCS-UNAM. (2021). dirección General de Comunicación Social. Estrés hídrico y desigualdad, factores que encarecen el agua. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021_244.html
- Fundación UNAM. (2021). Estrés hídrico: ¿nos estamos quedando sin agua? <https://www.fundacionunam.org.mx/ecopuma/estres-hidrico-nos-estamos-quedando-sin-agua/>
- Galindo, M., *et al.* (2019). Occurrence of emerging contaminants in environmental surface waters and their analytical methodology—a review. *Water Supply*, 19, pp. 1871-1884, 10.2166/ws.2019.087
- IINGEN. (2020). Túnel Emisor Oriente: una alternativa para mitigar el riesgo de inundaciones en la ZMVM. <http://www.ii.unam.mx/esmx/Investigacion/Proyecto/Paginas/TunelEmisorOriente.aspx>

- Jiménez, B., Durán J., & Méndez, J. El Agua en México: cauces y encauces. AMC, Conagua. México. 2010.
- Kapelewska., *et al.* (2018). Occurrence, removal, mass loading and environmental risk assessment of emerging organic contaminants in leachates, groundwaters and wastewaters. *Microchem. J.*, 137, pp. 292-301, 10.1016/j.microc.2017.11.008
- Lofrano., *et al.* (2020). Occurrence and Potential Risks of Emerging Contaminants in Water Visible Light Active Structured Photocatalysts for the Removal of Emerging Contaminants. Elsevier, pp. 1-25
- Miraji., *et al.* (2016). Research trends in emerging contaminants on the aquatic environments of Tanzania. *Scientifica*, p. 2016, 10.1155/2016/3769690
- Mofijur., *et al.* (2021). Source, distribution and emerging threat of micro- and nanoplastics to marine organism and human health: socio-economic impact and management strategies. *Environ. Res.*, 195, Article 110857, 10.1016/j.envres.2021.110857
- Murgolo., *et al.* (2017). A new supported TiO₂ film deposited on stainless steel for the photocatalytic degradation of contaminants of emerging concern. *Chem. Eng. J.*, 318 (2017), pp. 103-111, 10.1016/j.cej.2016.05.125
- Noyola, A., *et al.* (2012). Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. doi: 10.1002/clen.201100707
- Noyola, A., Morgan, J. M., & Güereca L. P., (2013). Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México. pp 36–39.
- Norvill., *et al.* (2016). Emerging contaminant degradation and removal in algal wastewater treatment ponds: identifying the research gaps. *J. Hazard. Mater.*, 313, pp. 291-309, 10.1016/j.jhazmat.2016.03.085
- Rathi., *et al.* (2021). A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: current trends and scope for further research. Article 124413, 10.1016/j.jhazmat.2020.124413
- Soto, E., *et al.* (2015). Influence of seasonal variation on the efficiency of pollutant removal of the wastewater treatment plant located in Juan Díaz, Panama City.

SINA, CONAGUA (2020). Comisión Nacional del Agua. Descarga de aguas residuales. http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquerymobile2.html?tema=descargasResiduales.

Wastewater Engineering Treatment. Disposal, Reuse, 1991. 3rd Edition. U.S.A. (Ingeniería en el tratamiento de aguas residuales. Disposición y reuso. Metcalf And Eddy. McGraw-Hill International Editions. 3a. Edición. E.U.A.).

ANEXOS

Tabla A.1. Datos obtenidos de la caracterización fisicoquímica de agua **influyente** en temporada de lluvias y estiaje, con su respectiva desviación estándar de las PTAR estudiadas.

PTAR Parámetro	CERRO DE LA ESTRELLA				CHAPULTEPEC				SANTA FE				ECODUCTO			
	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar
pH	6.89	0.01	6.95	0.04	7.37	0.13	6.96	0.11	7.43	0.05	7.17	0.05	7.52	0.29	7.06	0.06
Alk mgCa CO ₃ /L	158.67	17.82	185.83	26.56	80.33	17.63	93.33	13.59	113.00	31.89	145.00	10.80	163.67	8.22	158.33	7.17
DQOt mg/L	133.33	25.77	295.33	20.04	214.33	21.87	376.83	137.76	295.83	117.32	428.00	13.03	308.00	34.04	396.17	96.64
DQOs mg/L	79.67	8.28	150.67	6.11	113.50	20.06	191.83	42.00	137.00	46.18	163.50	14.00	155.50	10.33	206.00	9.54
DBO5t mg/L	ND	ND	131.56	0.00	ND	ND	345.85	0.00	ND	ND	224.64	0.00	ND	ND	283.60	0.00
DBO5s mg/L	ND	ND	12.20	0.00	ND	ND	127.49	0.00	ND	ND	85.44	0.00	ND	ND	56.70	0.00
COTT* mg/L	44.44	7.01	83.50	25.38	71.56	6.00	125.61	37.49	98.67	32.00	142.67	3.55	102.67	9.27	132.06	26.30
COTs* mg/L	26.67	2.33	65.17	19.57	37.89	5.40	63.94	11.43	45.67	12.57	54.50	3.81	51.83	2.81	68.67	2.60
ST mg/L	548.89	20.72	655.33	82.86	415.67	39.82	474.67	76.85	475.44	99.80	553.33	14.19	532.65	76.23	583.80	97.03
STV mg/L	154.89	8.53	268.00	45.30	175.89	31.39	232.67	63.26	195.11	55.28	292.00	44.68	229.17	28.79	291.13	49.81
STF mg/L	394.00	10.80	387.33	41.10	239.78	13.17	242.00	16.57	280.33	36.09	261.33	27.78	303.48	45.80	292.67	42.47
SST mg/L	38.33	12.74	113.33	2.31	67.33	4.93	125.33	38.44	94.33	34.85	186.00	33.05	93.21	18.27	168.47	88.71
SSV mg/L	32.67	9.87	102.00	17.32	62.00	5.29	107.33	31.90	82.33	31.88	162.67	30.09	79.73	16.34	139.80	67.37
SSF mg/L	5.66	2.36	11.33	16.03	5.33	0.47	18.00	5.89	12.00	2.05	23.33	2.49	13.48	1.58	28.67	18.06
SDT mg/L	510.56	14.55	542.00	68.37	348.33	32.00	349.33	34.65	381.11	55.42	367.33	16.11	439.44	49.15	415.33	16.36
SDV mg/L	122.22	9.65	166.00	26.98	113.89	23.15	125.33	25.63	112.78	22.12	129.33	15.17	149.44	10.91	151.33	25.00
SDF mg/L	388.33	9.43	376.00	42.36	234.44	13.63	224.00	16.97	268.33	34.18	238.00	29.53	290.00	44.78	264.00	24.66
Surfactantes mg/L	3.39	0.39	4.47	1.62	3.72	0.09	5.70	1.70	4.17	0.88	3.44	0.15	5.08	0.04	3.75	0.33
PT mg/L	2.63	0.37	3.98	0.31	1.17	0.53	2.88	0.99	2.47	1.01	4.25	0.23	3.77	0.70	4.37	0.45
PO ₄ ³⁻ mg/L	8.10	1.19	12.22	1.00	3.53	1.68	8.92	3.05	7.47	3.07	12.97	0.65	11.55	2.15	13.82	1.01
NTK mg/L	23.17	6.11	38.50	4.36	23.67	5.80	32.83	10.68	44.67	11.07	52.00	6.87	56.83	6.83	52.33	5.69
N-Norg mg/L	17.16	0.84	11.38	6.53	15.05	7.71	7.16	1.36	9.44	2.37	21.65	5.77	22.32	5.34	15.05	2.03
N-NH ₄ ⁺ mg/L	6.00	5.33	27.12	4.62	8.62	4.04	25.67	9.37	35.22	8.74	30.35	3.41	34.51	2.07	37.28	3.20
N-NO ₃ ⁻ mg/L	2.95	0.93	2.70	0.26	1.57	0.44	2.13	0.58	3.52	0.42	3.69	1.25	1.76	0.66	3.26	0.12
N-NO ₂ ⁻ mg/L	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
ColifFecales NMP /100 mL	ND	ND	5.83E+06	2.46E+06	ND	ND	4.53E+06	3.80E+06	ND	ND	3.38E+07	1.73E+07	ND	ND	1.93E+06	1.46E+06
ColifTotales NMP /100 mL	1.16E+07	9.33E+06	ND	ND	4.78E+07	4.44E+07	ND	ND	1.12E+07	2.69E+06	ND	ND	3.77E+07	9.74E+06	ND	ND
Huevos de Helminto HH/L	1.20	0.00	1.67	0.25	0.60	0.00	0.80	0.16	0.67	0.09	0.93	0.25	1.07	0.09	2.50	0.00
Conductividad µs/c	849.42	32.22	927.47	27.89	568.36	34.27	541.33	90.38	696.19	135.12	808.94	57.96	725.13	48.31	813.07	28.22
Temperatura °C	19.55	0.79	19.76	0.20	20.48	0.23	20.68	0.37	19.44	0.29	19.91	0.30	22.35	0.32	22.46	0.20

ND: No Determinado

Tabla A.2. Datos obtenidos de la caracterización fisicoquímica de agua **efluente** en temporada de lluvias y estiaje, con su respectiva desviación estándar de las PTAR estudiadas.

PTAR Parámetro	CERRO DE LA ESTRELLA				CHAPULTEPEC				SANTA FE				ECODUCTO			
	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar	Lluvias Promedio	Desviación estándar	Estiaje Promedio	Desviación estándar
pH	6.87	0.00	6.88	0.02	6.75	0.06	7.02	0.03	6.16	0.03	6.00	0.13	6.70	0.32	6.51	0.11
Alk mgCa CO ₃ /L	124.67	4.71	125.00	0.00	60.33	10.37	50.00	3.54	5.00	0.00	11.67	3.82	156.00	10.42	180.00	15.41
DQOt mg/L	29.83	2.52	28.50	22.75	15.33	12.77	18.83	8.39	15.67	7.59	21.83	7.32	60.00	31.63	50.00	2.78
DQOs mg/L	21.17	0.58	19.17	14.47	11.33	3.33	14.00	5.63	11.00	5.35	16.83	8.08	42.67	12.11	41.83	7.75
DBO5t mg/L	ND	ND	45.57	0.00	ND	ND	23.19	0.00	ND	ND	78.12	ND	ND	ND	87.13	0.00
DBO5s mg/L	ND	ND	9.35	0.00	ND	ND	10.98	0.00	ND	ND	64.28	ND	ND	ND	42.50	0.00
COTT* mg/L	5.39	2.11	9.08	0.46	6.17	0.16	5.88	0.49	8.12	0.59	8.55	0.38	14.13	2.09	13.54	1.69
COTs* mg/L	5.22	1.00	8.53	0.80	5.53	0.10	5.42	0.14	7.91	0.14	8.40	0.31	13.81	2.26	12.14	1.20
ST mg/L	520.56	22.19	481.67	10.77	308.78	19.73	300.50	22.47	456.56	9.45	423.33	37.06	444.22	23.09	451.00	27.07
STV mg/L	140.89	18.90	128.83	15.28	66.00	18.01	64.50	29.96	110.56	25.77	133.33	17.35	129.56	41.15	167.00	38.43
STF mg/L	379.67	33.2	352.84	15.41	242.78	18.77	236.00	18.55	346.00	16.28	290.00	33.05	314.67	41.26	284.00	53.39
SST mg/L	6.67	2.89	11.00	2.18	2.67	2.08	1.83	1.04	4.33	1.25	3.33	0.29	13.67	14.15	15.67	3.21
SSV mg/L	5.33	3.21	9.50	4.00	2.67	2.08	1.83	1.04	3.33	0.47	3.33	0.29	12.33	12.74	13.00	1.73
SSF mg/L	1.34	0.47	1.50	2.12	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.94	0.00	0.00	1.34	1.25	2.67	2.49
SDT mg/L	513.89	20.47	470.67	10.50	306.11	14.42	298.67	17.91	452.22	10.39	420.00	37.04	430.56	30.13	435.33	20.29
SDV mg/L	135.56	12.93	119.33	11.81	63.33	14.14	62.67	23.63	107.22	25.47	130.00	17.09	117.22	30.10	154.00	31.03
SDF mg/L	378.33	32.69	351.33	13.30	242.78	18.77	236.00	18.55	345.00	15.34	290.00	33.05	313.33	41.92	281.33	50.92
Surfactantes mg/L	0.33	0.09	0.15	0.03	0.09	0.02	0.00	0.00	0.46	0.10	0.00	0.00	0.74	0.90	0.00	0.00
PT mg/L	1.33	0.31	0.72	0.59	0.27	0.25	1.50	0.64	2.43	0.33	3.58	0.03	0.25	0.35	3.10	0.49
PO ₄ ³⁻ mg/L	4.13	0.90	2.20	1.79	0.70	0.73	4.57	1.97	7.50	1.07	10.88	0.08	0.73	1.04	9.53	1.39
NTK mg/L	12.33	1.04	14.83	2.47	4.33	2.93	2.33	2.08	26.17	3.30	31.50	3.50	8.17	10.32	18.17	1.26
N-Norg mg/L	12.75	0.75	11.02	3.86	4.33	2.39	2.24	1.71	26.17	3.30	31.22	3.49	8.17	8.43	5.48	1.87
N-NH ₄ ⁺ mg/L	7.63	8.21	3.82	2.95	1.20	1.22	0.10	0.02	0.53	0.05	0.28	0.03	3.57	5.67	12.68	1.67
N-NO ₃ ⁻ mg/L	0.00	0.00	4.05	0.70	0.00	0.00	0.90	0.33	0.00	0.00	6.25	1.17	0.00	0.00	1.53	0.25
N-NO ₂ ⁻ mg/L	0.00	0.00	0.32	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.08
ColifFecales NMP /100 mL	ND	ND	933.33	449.69	ND	ND	646.67	606.92	ND	ND	350.00	346.41	ND	ND	65.00	25.00
ColifTotales Huevos de Helmintho HH/L	308.64	124.75	ND	ND	205.28	77.68	ND	ND	256.49	35.87	ND	ND	374.58	45.03	ND	ND
Conductividad Temperatura μs/c m °C	765.58 19.71	72.46 1.53	799.58 20.23	27.33 0.30	473.03 21.03	21.82 0.24	542.47 21.06	94.27 0.27	544.39 19.50	7.61 0.73	629.89 19.44	26.27 0.29	604.27 19.23	16.64 0.77	749.93 20.87	29.86 0.77

ND: No Determinado

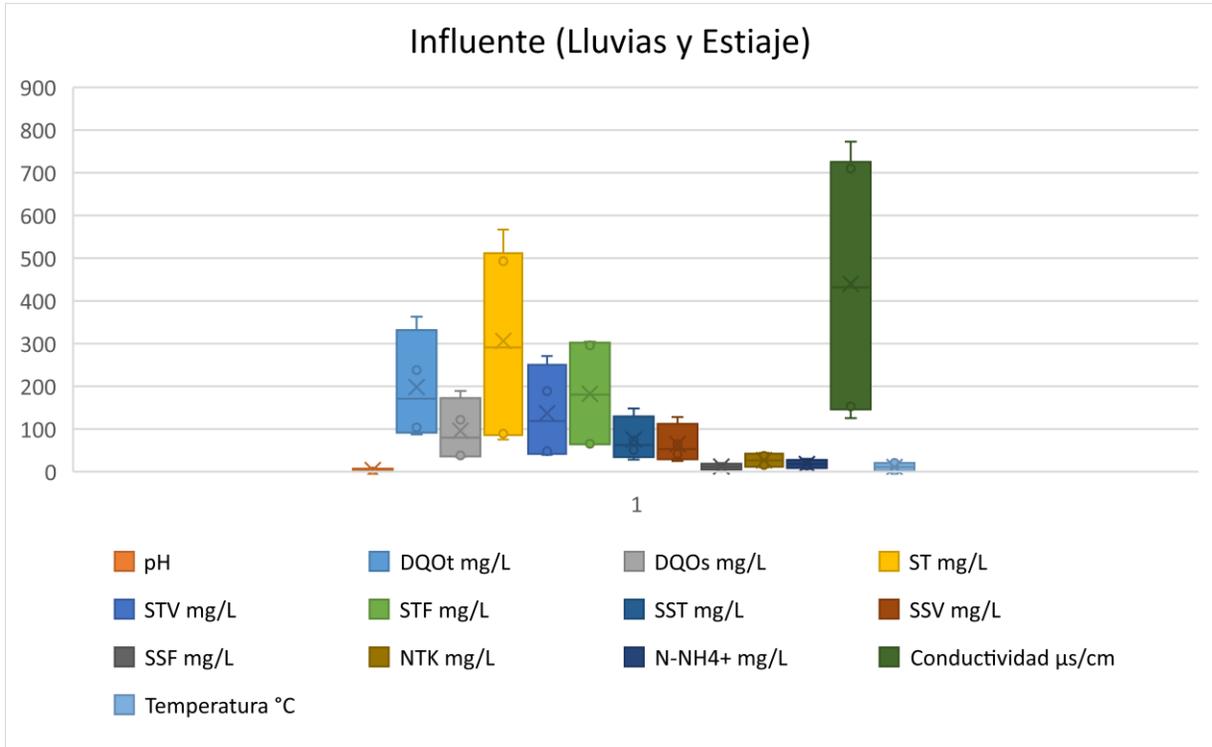


Figura A.1. Datos promedio y su respectiva desviación estándar del agua residual de la Cd. de México. en temporada de lluvias y estiaje.

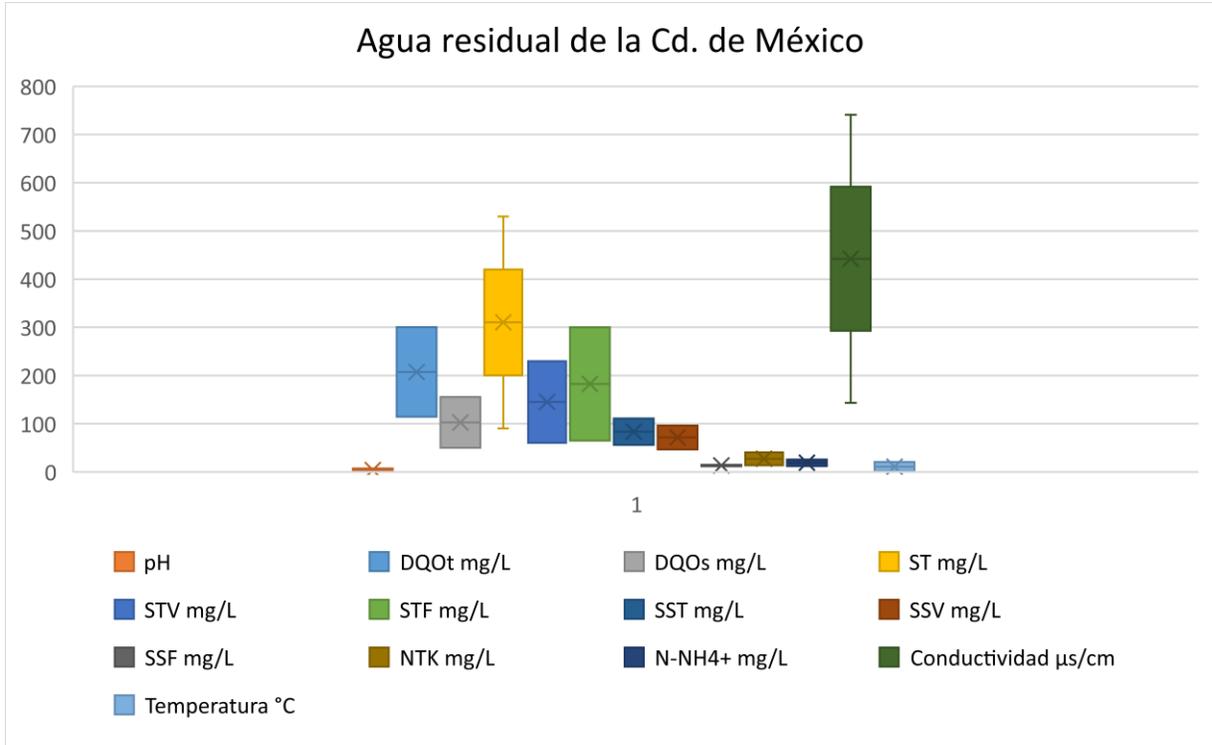


Figura A.2. Datos promedio y su respectiva desviación estándar del agua residual producida en la Cd. de México.