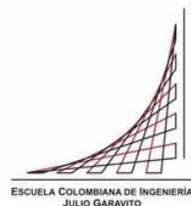


Maestría en Ingeniería Civil

**Evaluación de la operación de la planta de tratamiento de aguas
residuales del municipio de Ubaté**

Milton Mauricio Espitia Falla

Bogotá, D.C., 06 de marzo de 2015

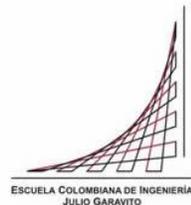


**Evaluación de la operación de la planta de tratamiento de aguas
residuales del municipio de Ubaté**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Ingeniería Ambiental**

**Jairo Alberto Romero Rojas
Director**

Bogotá, D.C., 06 de marzo de 2015



El trabajo de grado de maestría titulado “Evaluación de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ubaté”, presentado por Milton Mauricio Espitia Falla, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

Director del trabajo de Grado

Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado

María Paulina Villegas

Jurado

Gladys Roció González

Bogotá, D.C., 06 de marzo de 2015

Agradecimientos

A Dios por permitirme avanzar en el camino personal y profesional, a mi familia por apoyarme en todo momento, al Doctor Jairo Romero Rojas por su apoyo incondicional y a todos mis amigos que fueron cómplices en mi proceso de aprendizaje.

Resumen

Los estudios y diseños de la PTAR del municipio de Ubaté se inician en el año de 1988. En 1991 se termina la construcción y se da su puesta en marcha en convenio entre la Universidad de Los Andes y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. En la actualidad se evidencia baja remoción en el tratamiento, es por ello que con el fin de establecer criterios técnicos que permitan identificar las posibles falencias, se evalúan las características de diseño, operación, eficiencias y costos de operación.

Índice general

Introducción	1
Capítulo I. Objetivos	2
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos	2
Capítulo II. Marco Legal	3
Capítulo III. Antecedentes	4
Capítulo IV. Características de Diseño PTAR de Ubaté	5
4.1 Línea de Procesos de La PTAR	5
4.2 Cámara de alivio	6
4.3 Rejilla fina	6
4.4 Estación de bombeo	7
4.5 Vertedero de rebose	8
4.6 Sistema de cribado	9
4.7 Desarenador	10
4.8 Aforo	10
4.9 Tanque de homogeneización	11
4.10 Reactores Anaerobios de Flujo Pistón (RAP)	12
4.11 Sedimentadores secundarios	13
4.12 Lechos de secado	14
4.13 Parámetros de Diseño de la PTAR de Ubaté	15
Capítulo V. Condiciones Operación	19
Capítulo VI. Análisis de la Eficiencia de la PTAR	21
6.1 DBO5	21
6.2 DQO	24
6.3 SST	27
6.4 pH	30
6.5 Tiempo de Retención	31
Capítulo VII. Costos de la PTAR	32

Capítulo VIII. Conclusiones	34
Capítulo IX. Referencias	36

Índice de tablas

Tabla 1. Normas de Vertimiento	3
Tabla 2. Parámetros de diseño de los lechos de secado	15
Tabla 3. Características de la PTAR de Ubaté	16
Tabla 4. Condiciones de Operación de la PTAR de Ubaté	19
Tabla 5. Evaluación de los procesos de la PTAR Ubaté	20
Tabla 6. Valores propuestos para vertimiento sobre cuerpos de agua superficial.	21
Tabla 7. Caracterización de DBO ₅ PTAR Ubaté	22
Tabla 8. Caracterización de DQO PTAR Ubaté	24
Tabla 9. Caracterización de SST PTAR Ubaté	27
Tabla 10. Caracterización del pH en la PTAR Ubaté	30
Tabla 11. Costos de operación de la PTAR de Ubaté	32
Tabla 12. Resumen de costos de operación PTAR	33

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de la PTAR Ubaté	5
Figura 2. Cámara de alivio	6
Figura 3. Rejillas finas	7
Figura 4. Sistema de control del bombeo	7
Figura 5. Salida de la estación de bombeo	7
Figura 6. Rejillas de protección para bombas	8
Figura 7. Válvulas para control de caudales a la salida de la estación de bombeo	8
Figura 8. Vertedero de rebose de caudales de exceso	9
Figura 9. Sistema de cribado	9
Figura 10. Desarenador	10
Figura 11. Vertedero tipo Sutro y regla para medición de caudal.	10
Figura 12. Tanque de homogeneización	11
Figura 13. Vertederos y canales para distribución a los RAP	12
Figura 14. RAP	12
Figura 15: Material de soporte del RAP	13
Figura 16. Unidades de sedimentación	14
Figura 17. Lechos de secado	15
Figura 18. DBO5 para afluente y efluente	22
Figura 19. Carga de DBO ₅ en el afluente	23
Figura 20. Carga volumétrica de DBO5	23
Figura 21. Porcentaje de remoción en DBO ₅	24
Figura 22. DQO afluente y efluente	25
Figura 23. Carga DQO en el afluente	26
Figura 24. Carga volumétrica de DQO	26
Figura 25. Porcentaje de remoción en DQO	27
Figura 26. SST afluente y efluente	28
Figura 27. Carga SST afluente	29
Figura 28. Carga SST en el efluente	29
Figura 29. Porcentaje de remoción en SST	30

Introducción

El municipio de Ubaté desde hace más de 20 años cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR, diseñada con una proyección al 2010, por lo que se considera que en la actualidad requiere ampliación de su capacidad.

En este documento se presentan los resultados de la evaluación de la operación de la PTAR del municipio de Ubaté, a partir de la información disponible para el periodo de octubre 2011 – agosto 2012, objetivo propuesto para su elaboración.

Este trabajo se fundamenta en las condiciones de diseño para la PTAR del municipio de Ubaté, es por ello que se establecen los parámetros que se tuvieron en cuenta para su funcionamiento con el fin de evaluar su efectividad en el tratamiento.

En el capítulo 3 se resume el marco legal vigente para el control del vertimiento de las aguas residuales municipales y en el capítulo 4 los antecedentes de referencia para la PTAR de Ubaté.

En el capítulo 5 se presentan las características de diseño de la PTAR y en capítulo 6 sus condiciones de operación.

En el capítulo 7 se incluyen los análisis de las eficiencias de remoción de los parámetros evaluados en la operación de la PTAR, y en el capítulo 8 los costos de ejecución de la PTAR.

Finalmente, en el capítulo 9 se formulan las conclusiones pertinentes.

Capítulo I

Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ubaté.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diagnóstico de la operación de la PTAR de Ubaté.
- Evaluar la eficiencia de la PTAR de Ubaté

Capítulo II

Marco Legal

En la Tabla 1 se presentan las principales normas del marco legal aplicable a los vertimientos de aguas residuales en Colombia.

Tabla 1. Normas de Vertimiento

NORMA	RESUMEN	ENTIDAD
DECRETO LEY 2811 DE 1974	Dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Presidencia de la República
DECRETO 1594 DE 1984	Reglamenta usos del agua y residuos líquidos. Derogado por el Decreto 3930 de 2010, quedando vigentes transitoriamente los artículos 37 a 48, 72 a 79, 155, 156, 158, 160 y 161, hasta tanto el Ministerio de Ambiente expida las correspondientes regulaciones.	Presidencia de la República
DECRETO 1600 DE 2005	Reglamenta el sistema nacional ambiental, SINA, señala que: "Los laboratorios que produzcan información cuantitativa física, química y biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes, y los demás que produzcan información de carácter oficial, relacionada con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, deberán poseer el certificado de acreditación correspondiente otorgado por los laboratorios nacionales públicos de referencia del IDEAM, con lo cual quedarán inscritos en la red".	MAVDT
NTC-ISO/IEC COLOMBIANA 17025 DE 2005	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.	ICONTEC
DECRETO 2570 DEL 2006	Añade el Decreto 1600 de 1994 y se dictan otras disposiciones sobre el análisis de características físicas, químicas y biológicas en laboratorios acreditados por el IDEAM o en proceso de acreditación.	MAVDT
RESOLUCIÓN 3180 DE 2008	Lineamientos técnicos para registro y permiso de vertimientos	MAVDT - SDA
DECRETO 3930 DE 2010	Reglamenta usos del agua y residuos líquidos	MAVDT
DECRETO 4728 DE 2010	Modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010, frente a la norma de vertimientos, protocolos de monitoreo de vertimientos y planes de cumplimiento.	MAVDT
RESOLUCIÓN 292 DE 2013	Establece criterios de aceptación de la información cuantitativa, física, química y biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes, e información de carácter oficial relacionada con los recursos aire y suelo, durante el periodo de transición fijado en el Decreto 2570 de 2006; y el procedimiento de verificación del cumplimiento de dichos criterios.	IDEAM

Capítulo III

Antecedentes

Los estudios y diseños de la PTAR del municipio de Ubaté se inician en el año de 1988. En 1991 se termina la construcción de la PTAR y se da su puesta en marcha en convenio entre la Universidad de Los Andes y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR.

El diseño y construcción costó, en pesos de 1991, trescientos veintisiete millones seiscientos cuarenta y siete mil seiscientos cincuenta y tres pesos (\$327.647.653). La PTAR se encuentra ubicada en un predio con un área de 1,77 Ha y tan solo está construida 0,10 Ha.

Obra realizada y financiada entre la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR y la alcaldía municipal de Ubaté. La PTAR de Ubaté, la cual funcionaba bajo los lineamientos y presupuesto de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, realizando la caracterización, análisis del agua, así como la gestión de permiso para los vertimientos.

En octubre de 2012, fue entregada al municipio para su administración, operación y mantenimiento, aludiendo que las Corporaciones autónomas regionales no son empresas prestadoras de servicios públicos, bajo la resolución CAR 2273.

La PTAR fue diseñada para 45 L/s y una población no superior a 18.000 habitantes; sin embargo, actualmente cuenta con más de 28.000 usuarios, incluyendo el sector industrial, motivo por el cual no trata la totalidad del caudal y debe trabajar a su máxima capacidad.

4.2 Cámara de alivio

Existe un pozo de inspección con cámara de alivio, el cual se encarga de regular un caudal de entrada de 45 L/s, ubicado a tan solo 400 metros de la Planta (Figura 2). Afluente con diámetro de 36" proveniente del sistema de alcantarillado mixto y dos salidas de 24"; los excesos son conducidos directamente al río Suta sin tratamiento alguno.



Figura 2. Cámara de alivio

4.3 Rejilla fina

Posterior a la cámara de alivio, el afluente fluye a través de una rejilla con aberturas de 1,5 cm de espacio entre cada una de ellas y ubicada a 10° con respecto a la vertical. Esta rejilla se puede levantar a través de una polea para realizar su limpieza (Figura 3). Esta rejilla es de limpieza manual.



Figura 3. Rejillas finas

4.4 Estación de bombeo

Está conformada por 3 bombas de tipo sumergible con una potencia de 3,7 kW cada una, diseñadas para transportar un caudal de 38 L/s y vencer una cabeza dinámica de 7,9 m. La tubería de salida del caudal es de 4" (figura 4, 5 y 7).

El sistema de bombeo tiene un funcionamiento tipo 2+1, dos en funcionamiento y una en stand by. Este sistema cuenta con unas rejillas (Figura 6) con aberturas de 5 cm, posicionadas con un ángulo de 45° con respecto a la base. Esta rejilla es de limpieza manual.



Figura 4. Sistema de control del bombeo



Figura 5. Salida de la estación de bombeo



Figura 6. Rejillas de protección para bombas



Figura 7. Válvulas para control de caudales a la salida de la estación de bombeo

4.5 Vertedero de rebose

El vertedero cumple con las características necesarias para evacuar el caudal sobrante en caso de inoperancia u ocurrencia de algún evento inesperado. Está diseñado para evacuar el agua cuando supera los 60 L/s (capacidad máxima de la PTAR). El rebose del agua es conducida al Río Suta directamente. (Figura 8).



Figura 8. Vertedero de rebose de caudales de exceso

4.6 Sistema de cribado

El agua bombeada se dirige por un canal de 60 cm de ancho y pasa por rejilla (Figura 9) con aberturas de 5 cm de espacio entre cada una de ellas, posicionadas con un ángulo de 45° con respecto a la base hasta el desarenador. Esta rejilla es de limpieza manual.



Figura 9. Sistema de cribado

4.7 Desarenador

Es una estructura que está compuesta por dos compartimientos paralelos con dimensiones de 8,5 m de largo, 0,8 m de ancho y 0,70 m de profundidad. En cuanto a la velocidad mínima del agua, se estima en 0,5 m/s. (Figura 10). En cada compartimiento existen dos compuertas guillotina, una a la entrada y otra a la salida, con el fin de aislar cada unidad para mantenimientos y limpieza (operación 1+1, uno en funcionamiento y uno stand-by). La evacuación de las arenas se hace de manera manual.



Figura 10. Desarenador

4.8 Aforo

El aforo se realiza por medio de vertedero tipo Sutro (Figura 11), el cual, por medio de regla calibrada, mide el caudal que pasará al proceso de los RAP y que sirve como unidad de control del desarenador.



Figura 11. Vertedero tipo Sutro y regla para medición de caudal.

4.9 Tanque de homogeneización

Este vertedero descarga sobre una cámara de entrada de 2,5 x 2,05 m de área y 4,5 m de profundidad, lo que da unos 23 m³ de almacenamiento. Está construido en concreto y está encargado de la regulación y estabilización de la turbulencia (Figura 12) antes de entrar a los reactores anaerobios de flujo pistón (RAP). Sin embargo, este tanque tiene una entrada y salida superior, lo que no permite el recorrido completo para homogeneizar. Sirve más como tanque previo a la distribución.

Posterior al tanque, la estructura se divide en cuatro conductos de distribución, los cuales tienen un metro de largo y 0,5m de ancho, cada uno con su respectiva compuerta de control de entrada al reactor. El caudal de cada compartimiento es de 20,25 L/s (Figura 13).



Figura 12. Tanque de homogeneización



Figura 13. Vertederos y canales para distribución a los RAP

4.10 Reactores Anaerobios de Flujo Pistón (RAP)

En la Figura 14, se muestra el reactor conformado por cuatro unidades. La altura total es de 4,45 m teniendo en cuenta que sobre el reactor se encuentran las estructuras de tratamiento primario: rejillas, desarenador y estructura repartidora de flujo. La altura de la lámina de agua es de 2,91 m, con un borde libre de 0,10 m. El volumen de los cuatro reactores es de 2436 m³. El largo del sistema es de 28 m por 29,4 m de ancho.

En cada reactor hay dos formas de baffles. Cuatro baffles tipo 1 que son los que permiten el paso del agua por debajo y tres baffles tipo 2 que son los que permiten el flujo del agua por encima.



Figura 14. RAP

La velocidad hidráulica en las cámaras de los reactores es menor o igual a 3m/h, 5 cm/min, para evitar el arrastre de lodo. En las dos primeras filas de reactores se encuentran colocadas cinco filas de cajas plásticas perforadas que cumplen la función de medio poroso en el interior del RAP, totalizando 924 cajas por reactor (Figura 15).

El efluente del reactor, es conducido a un sedimentador de 8,67 m de largo, 6,90 m de profundidad, 2,5 m de ancho y un volumen de 174 m³ por cada una de las estructuras presentes. La velocidad de flujo es de 0,7 m/h.



Figura 15: Material de soporte del RAP

4.11 Sedimentadores secundarios

Son 4 sedimentadores, con dimensiones de 8,7 m de largo, 6,90 m de ancho, 2,5 m de profundidad. Contando la zona de lodos, el volumen es de 174 m³ por cada uno y tienen un área superficial de 60 m². Estos sedimentadores (Figura 16) cuentan con estructuras para la evacuación de gases de 0,20 m de ancho. En la parte superior se ubican los colectores provenientes de los reactores. Cada sedimentador tiene 4 canaletas que reciben el agua por sus lados. La longitud de cada canaleta es de 6,6 m, 0,4 m correspondiente al apoyo, con una pendiente del 1% y un ancho de 0,20 m.

El caudal máximo que se transporta por canaleta es de 5,06 L/s. Las canaletas se unen para llevar el agua al canal recolector del efluente que se ubica en el pozo seco. En el pozo seco que hace parte de los reactores se encuentra la unidad de

recolección del efluente, proveniente de las canaletas recolectoras de agua de los sedimentadores. Esta unidad se dispone en forma de canal y se ubica lateralmente. Sus dimensiones son: 7,8 m de largo, 0,3 m de ancho y pendiente del 1%, caudal total promedio de 45 L/s.



Figura 16. Unidades de sedimentación

4.12 Lechos de secado

El lodo generado en el tratamiento, es conducido a 4 lechos de secado construidos en un área de 9 m² cada uno. Consta de tres capas: la primera con un espesor de 30 cm de grava, que servirá como espesor para el secado de lodos, seguida de una capa de 10 cm de arena y por último se tiene una capa de 30 cm de grava. Todo ello sobre un sistema de drenaje que consiste en una tubería de PVC sanitaria de

diámetro 6" la cual llega a la cámara de control de flujo del emisario final. En la Figura 17 se presentan las características de los lechos de secado y en la Tabla 2 los parámetros de diseño de los lechos de secado.

Tabla 2. Parámetros de diseño de los lechos de secado

PARÁMETRO	VALOR
Producción de lodos	1 m ³ /1000 m ³ de agua tratada
Caudal lodos	5,2 m ³ /día
Filtración diaria	0,9 m ³ /día
Área requerida para el caudal de diseño	34,4 m ² (8,6 m ² x unidad)
# Unidades	4 unidades de 9 m ² cada una

Fuente: Informe PTAR Municipio Ubaté (2012)



Figura 17. Lechos de secado

4.13 Parámetros de Diseño de la PTAR de Ubaté

En la Tabla 3 se presentan las características de la PTAR de Ubaté relacionando los valores de diseño y los criterios de cumplimiento según el RAS 2000 y otros autores.

Tabla 3. Características de la PTAR de Ubaté

Unidad	Parámetro	Valor de Diseño	Criterio RAS 2000, Metcalf & Eddy (1995) ó Romero (2012)	Cumple	Observaciones
Cámara de Alivio	Caudal	3888 m ³ /d	<45 L/s	Cumple	De acuerdo con los aforos, la planta, en el 95% de su operación, trata caudales superiores a 45 L/s.
Sistema de Bombeo	Caudal	38 L/s cada bomba	22,5 – 38 L/s	Cumple	Dos bombas en funcionamiento dan 76 L/s en promedio.
	Unidades	3 bombas sumergibles	2 bombas sumergibles	Cumple	Se usa sistema 2+1
Cribado	Espaciamiento	5 cm	1,5 – 5 cm	Cumple	Para limpieza manual.
	Velocidad entre rejas	0,38 m/s	0,3 – 0,6 m/s	Cumple	Para limpieza manual.
	Inclinación	45° con la vertical	30 – 45°	Cumple	Para limpieza manual. (Metcalf & Eddy, 1995)
Desarenador	Unidades	2 módulos	Mínimo 2	Cumple	Funcionamiento 1 + 1
	Velocidad de sedimentación	762 m/d	700 – 1600 m/d	Cumple	El caudal de entrada es regulado a menos de 60 L/s. En promedio son 45 – 55 L/s. Los cálculos se realizan a 60 L/s.
	Velocidad horizontal	0,17 m/s	0,2 – 0,4 m/s	Cumple	
	Tiempo de retención hidráulico	50 s	20 s – 1 min	Cumple	
	Relación Ancho:Profundidad	1,14:1	1:1 – 5:1	Cumple	
	Relación Largo:Ancho	10,6:1	2,5:1 – 5:1	No Cumple	
	Caudal	60 L/s max	NA	NA	
Tanque de igualación	Unidades	1 módulo	1 módulo	Cumple	
	Caudal	60 L/s máximo	NA	NA	La distribución de caudal puede generar zonas muertas
RAP	Caudal promedio	11,25 L/s cada uno. Total: 45 L/s	NA	NA	
	Temperatura ambiente	10 – 14 °C	>15 °C	No cumple	El documento de la secretaría de servicios públicos de la alcaldía, indica un diseño a 6,5 °C.
	Separador de gases	No existe	Se recomienda plástico	NA	No es requisito, pero se debe tener en cuenta
	Profundidad	2,95 m	2,7 m	Cumple	
	Tiempo de retención	11 - 15 horas	9 – 10 h a 15°	cumple	
	Carga orgánica	2356 kg DBO/d	NA	NA	Representa afluente con 606g DBO/m ³
	Carga volumétrica	970 g/m ³ /d	NA	NA	Adecuada para proceso anaerobio
	Volumen	2436 m ³	NA	NA	
Velocidad de flujo	3 m/h	3 m/h	Cumple	Preferible < 2 m/h para evitar pérdida de biomasa	

Fuente: CONHYDRA y comprobación en campo.

Tabla 3. Características de la PTAR de Ubaté (Continuación)

Sedimentador	Caudal	11,25 L/s cada uno. Total: 45 L/s	<11,25	Cumple	
	Volumen	174 m ³ cada uno.	NA	NA	
	Tiempo de retención	4,3 h	1,5 – 2,5 h	Cumple	Romero (2012, 640)
	Velocidad de sedimentación a Qmax	22 m/d	24 m/d	Cumple	Cumple
	Carga superficial	16,2 m/d	24 m/d	Cumple	Romero (2012, 644)
	Profundidad	2,5 m	2, 7 m	Cumple	
	Carga de sólidos	110 kg/d*m ²	23 - 164 kg/d*m ²	Cumple	Romero (2012, 644)
	Carga sobre el vertedero	1,7 l/s*m	1,4 – 5,7 l/s*m	Cumple	Romero (2012, 640)
Lechos secado de	Caudal lodos	5,2 m ³ /d	19,6 m ³ /d	No cumple	Romero (2012, 759) 70% de remoción de SST y 4% de sólidos en lodo (tabla 26.2)
	Producción de lodos	1 m ³ de lodo / 1000 m ³ agua	1 m ³ lodo/198 m ³ agua tratada		Calculada de Caudal de lodos
	Altura de Arena	0,1 m	0,3 a 0,46 m	No cumple	
	Altura de Grava inferior	0,3 m	0,2 a 0,46 m	Cumple	
	Altura de Grava superior	0,3	NA	NA	Capa de grava en la parte superior
	Cubrimiento	No posee	Se recomienda cobertura o techo	NA	No es exigencia
	Área por habitante	0,002 m ² /hab	0,1 m ² /hab	No cumple	Romero (2012, 833)
	Área	36 m ²	1800 m ²	No cumple	
	Carga de sólidos	7970 kg/año*m ²	110 kg/año*m ²	No cumple	Romero (2012, 833)

Fuente: CONHYDRA y comprobación en campo.

Como se observa en la Tabla 3, los desarenadores cumplen los parámetros de diseño del RAS, aunque la velocidad horizontal, es un poco menor al rango estipulado. Las unidades de cribado cumplen con los parámetros de diseño del RAS 2000 y las limpiezas manuales se realizan sin problemas.

Aunque el tanque de homogeneización se diseñó inicialmente como una trampa de grasas, la limpieza y la operación no permite que las grasas provenientes de la industria lechera puedan removerse adecuadamente.

Los RAP, según la Tabla 3, los parámetros de diseño que cumplen con el RAS 2000 son el tiempo de retención, la profundidad y la velocidad de flujo entre los separadores. El sistema RAP es considerado, según datos de ROMERO (2012), favorable en temperaturas mayores de 15°C, y las condiciones de Ubaté, con temperaturas de 6,5°C, son desfavorables para dicho sistema.

Las cajas como soporte de microorganismos es una solución de bajo costo, sin embargo es conveniente el cambio a materiales con mayor área superficial y menor volumen, con el fin de propiciar mayor crecimiento de la población microbiana.

El sedimentador cuenta con un diseño que se ajusta a todos los parámetros del RAS 2000 y autores como Romero (2012), aunque el tiempo de detención de 4,3 horas, supere el sugerido de 1,5 a 2,5 horas.

La Tabla 2 presenta los parámetros de diseño de los lechos de secado y su comparación con el RAS 2000, donde se observa que la altura de la arena no es la recomendada para lechos convencionales de lodos. No necesita placa de salpicamiento, pero no posee cobertura o techo, necesario para las condiciones pluviométricas de Ubaté.

Capítulo V

Condiciones Operación

Las condiciones de operación actuales del sistema de tratamiento de aguas residuales de Ubaté se muestran en la Tabla 4. Hasta 2012, la empresa COHYDRA realizó la operación, para lo cual se realizaron monitoreos mensuales y se registró la operación de cada unidad.

Tabla 4. Condiciones de Operación de la PTAR de Ubaté

Parámetro	Diseño	Operación	Observación
Población (Habitantes)	18.000	28.000	Sobrecarga
Caudal de diseño (L/s)	45	45 -55	Sobrecarga
Caudal máximo (L/s)	60	55	Adecuado
DBO Afluente (Kg/día)	2356	1800 - 2700	Sobrecarga
DBO Afluente (mg/L)	606	350 - 700	Sobrecarga
Eficiencia de remoción DBO (%)	86	25 - 64	Ineficiente
DQO Afluente (Kg/día)	7671	7000 - 8000	Sobrecarga
DQO Afluente (mg/L)	1973	1500 - 2500	Sobrecarga
Eficiencia de remoción DQO (%)	86	30 - 60	Ineficiente
SST (Kg/día)	1123	1200 - 2600	Sobrecarga
SST (mg/L)	289	300 - 680	Sobrecarga
Eficiencia de remoción SST (%)	70	60 - 80	Satisfactorio
GyA (Kg/día)	575	550 - 600	Adecuado
GyA (mg/L)	148	120 - 180	Adecuado
Eficiencia de remoción GyA (%)	31	ND	ND

Fuente: CONHYDRA y comprobación en campo.

Como se observa en la Tabla 4, los valores de operación de la PTAR, sobrepasan los de diseño en: población, caudal, DBO, DQO, SST y grasas y aceites. Por otra parte, la remoción de DBO y DQO son insuficientes y sólo cumple satisfactoriamente en remoción de SST, sin conocerse la remoción en grasas y aceites, por tanto, la operación de la PTAR no cumple los requerimientos de eficiencia del Decreto 1594 de 1984.

Las bajas temperaturas y las bajas cargas de materia orgánica (alimento), predicen un metabolismo lento y de bajo crecimiento en los reactores anaerobios, lo que se traduce, probablemente, en los resultados pobres en remoción de DBO5 y DQO.

Tabla 5. Evaluación de los procesos de la PTAR Ubaté

Unidad	Descripción
Cámara de alivio	Opera 24 h/d, alivia los caudales mayores a 45 L/s y los excesos son dirigidos directamente al río Suta. Se realiza mantenimiento con dragado cada 5 años.
By –Pass	Funciona 24 h/d, se realiza una limpieza dos veces al día.
Rejilla Fina y Cribado	Para las tres rejillas existentes se realiza una limpieza dos veces al día con una escobilla especial, retirando de forma manual el material atrapado.
Estación de Bombeo	De las tres bombas existentes, solo se operan dos, quedando una tercera en reserva para imprevistos o mantenimiento. Se realiza una revisión periódica de cada máquina cada seis meses.
Vertedero de Rebose	Está disponible 24 h/d, se le realiza un mantenimiento preventivo cada seis meses.
Desarenador	Existen dos estructuras de las cuales sólo opera una por día, la segunda se utiliza en caso de mantenimiento y limpieza. Se realiza limpieza manual
Tanque de Homogeneización	Contiene 4 vertederos con compuertas que permiten aislar de manera independiente, las unidades de los RAP y sedimentadores.
Reactor Anaerobio de Flujo Pistón (RAP)	Funciona las 24 h/d. Anualmente se hace mantenimiento y pueden salir de operación cada una de las unidades por separado, inhabilitadas desde el tanque homogeneizador, reduciendo la capacidad de la PTAR. El mantenimiento no implica lavar las canastas que contiene el RAP para evitar pérdida de la carga orgánica en el proceso de arranque.
Sedimentadores	Los cuatro sedimentadores operan 24h/d. Anualmente se hace mantenimiento y pueden salir de operación cada una de las unidades por separado. Así mismo, los RAP también pueden salir de operación, por medio del juego de compuertas en el tanque homogeneizador, reduciendo la capacidad de la PTAR.
Lechos de Secado	Posee cuatro compartimientos los cuales se van cargando de lodos uno a uno. Una vez se realice el proceso de secado, se recolectan los lodos y se disponen en relleno sanitario. El mantenimiento de cada compartimiento es semanal.

Fuente: Municipio de Ubaté (2012), CONHYDRA y comprobación en campo.

Capítulo VI

Análisis de la Eficiencia de la PTAR

El análisis se elabora con los resultados obtenidos para once muestras del afluente y del efluente durante el periodo comprendido entre octubre de 2011 y agosto del 2012. El comportamiento de la DBO5, DQO, SST y pH, se presentan a continuación. Las grasas y aceites no hacen parte del análisis puesto que el operador de la planta de tratamiento no realiza análisis de este parámetro.

Aunque la norma vigente para calidad de vertimientos está incluida en el artículo 72 del decreto 1594 de 1984; para efectos comparativos, se presentan los límites del borrador de resolución propuesto en 2012.

Tabla 6. Valores propuestos para vertimiento sobre cuerpos de agua superficial.

Parámetro	Unidades	Valores máximos Permisibles en cuerpos de agua superficial
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	400,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	200,0
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	200,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,0
Grasas y Aceites	mg/L	50,0
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	5,0
Fósforo Total (P)	mg/L	5,0
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10,0
pH	Unidades de pH	5 a 9

Fuente: MAVDT Borrador resolución de 2012.

6.1 DBO5

En la Tabla 7 y en la Figura 21 se puede observar que la remoción en DBO5 no supera el 80%, valor requerido por el Decreto 1594/84 y el RAS 2000 (pág E.46,). El valor promedio de remoción en DBO5 es del 43% ± 13%, el cual no supera los valores esperados para tratamiento de agua residual doméstica.

Tabla 7. Caracterización de DBO₅ PTAR Ubaté

PERIODO	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	% Eficiencia	Carga afluente (kg/d) (Para 45 L/s)	Carga volumétrica (kg/m ³ *d)
oct-11	384	231	40%	1.493	0,61
nov-11	364	213	41%	1.415	0,58
feb-12	553	212	62%	2.150	0,88
mar-12	347	223	36%	1.349	0,55
abr-12	349	203	42%	1.357	0,56
may-12	455	341	25%	1.769	0,73
jun-12	692	250	64%	2.690	1,10
jul-12	528	368	30%	2.053	0,84
ago-12	416	215	48%	1.617	0,66
Promedio	454±117	251±61	43%±13%	1766±453	0,72±0,19

Fuente: CONHYDRA (2012).

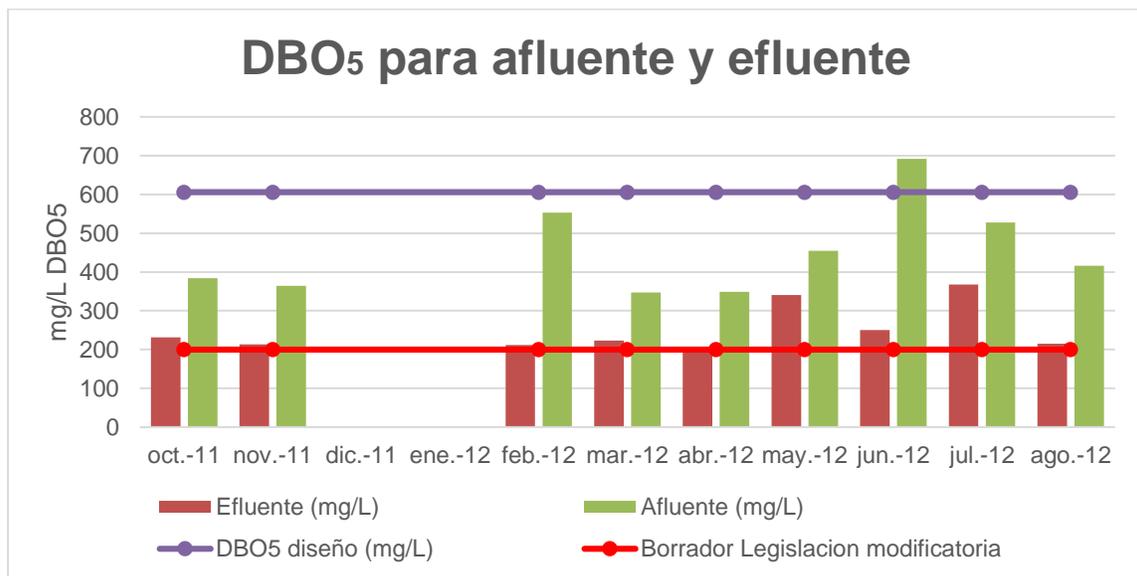


Figura 18. DBO₅ para afluente y efluente

En la Figura 18 se observa que sólo en un mes se sobrepasó la concentración de la DBO₅ de diseño. La mayoría de meses, la concentración de DBO₅ del afluente es inferior a la de diseño. El diseño de la PTAR contempla una carga en DBO₅ de 2356 kg/d para un caudal de 45 L/s y DBO de 606 mg/L. Con respecto al borrador de

resolución, se puede observar que en todos los meses se está sobre el límite propuesto para el efluente de 200 mg/L.

En la Figura 19 se observa que en la operación se registran cargas afluentes inferiores a las de diseño.

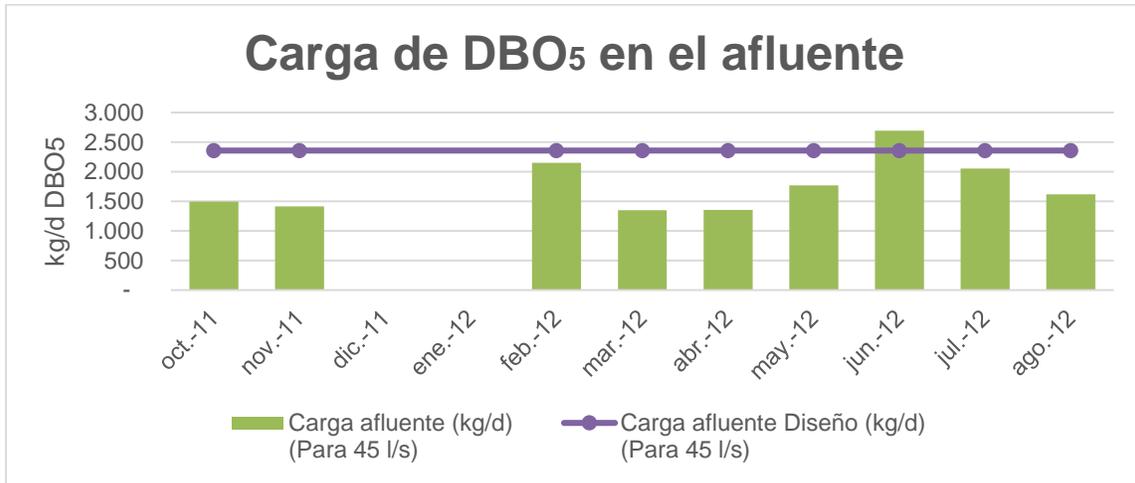


Figura 19. Carga de DBO₅ en el afluente

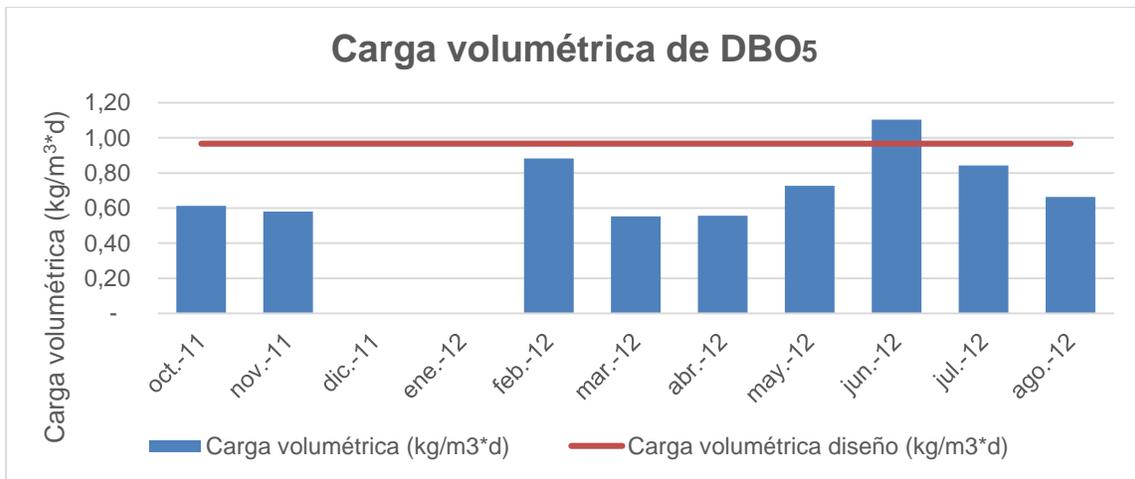


Figura 20. Carga volumétrica de DBO₅

Aunque las concentraciones de DBO₅ del afluente, 454 117 mg/L en promedio (Tabla 7), son altas para un agua residual doméstica, las cargas volumétricas sobre el RAP que son en promedio de $0,72 \pm 0,19$ kg/m³*d, no sobrepasan la carga

volumétrica de diseño de 0,91 kg/m³*d, salvo en el mes de Junio de 2012 (Figura 20). Dichos valores están por debajo del diseño, y pueden influir en el buen funcionamiento de la PTAR.

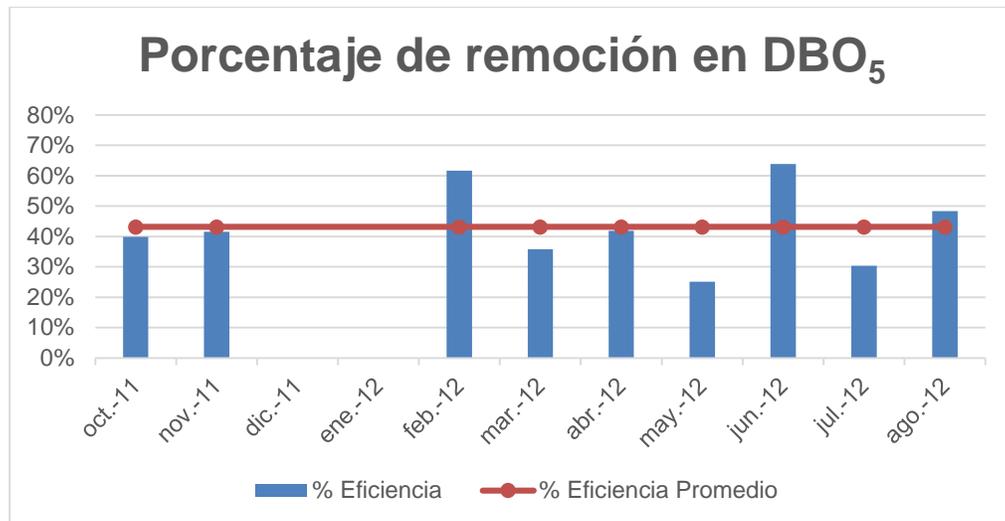


Figura 21. Porcentaje de remoción en DBO₅

6.2 DQO

En la Tabla 8 y en la Figura 25 se puede observar que la remoción promedio en DQO es del 43%±25%, y sólo en el mes de Abril de 2012 superó el 65%. Los valores típicos de remoción para DQO según el RAS 2000 (pág E.46) son del 65 al 80%.

Tabla 8. Caracterización de DQO PTAR Ubaté

PERIODO	AFLUENTE (mg/L)	EFLUENTE. (mg/L)	% EFICIENCIA	Carga afluente (kg/d) (Para 45 l/s)	Carga volumétrica (kg/m ³ *d)
oct-11	612	524	14%	2.379	0,98
nov-11	605	415	31%	2.352	0,97
dic-11	357	147	59%	1.388	0,57
feb-12	726	348	52%	2.823	1,16
mar-12	513	464	10%	1.995	0,82
abr-12	572	34	94%	2.224	0,91
may-12	918	472	49%	3.569	1,47
jun-12	733	430	41%	2.850	1,17
jul-12	812	512	37%	3.157	1,30
Promedio	650±168	372±170	43%±25%	2.526±652	1,04±0,27

Fuente: CONHYDRA (2012)

En la Figura 22 se observa que en ningún mes se sobrepasó la concentración de diseño. La operación de la PTAR registra concentraciones para la DQO en el afluente y el efluente, inferiores a la de diseño.

Con respecto al borrador de resolución, se puede observar que en casi todos los meses se está sobre el límite.

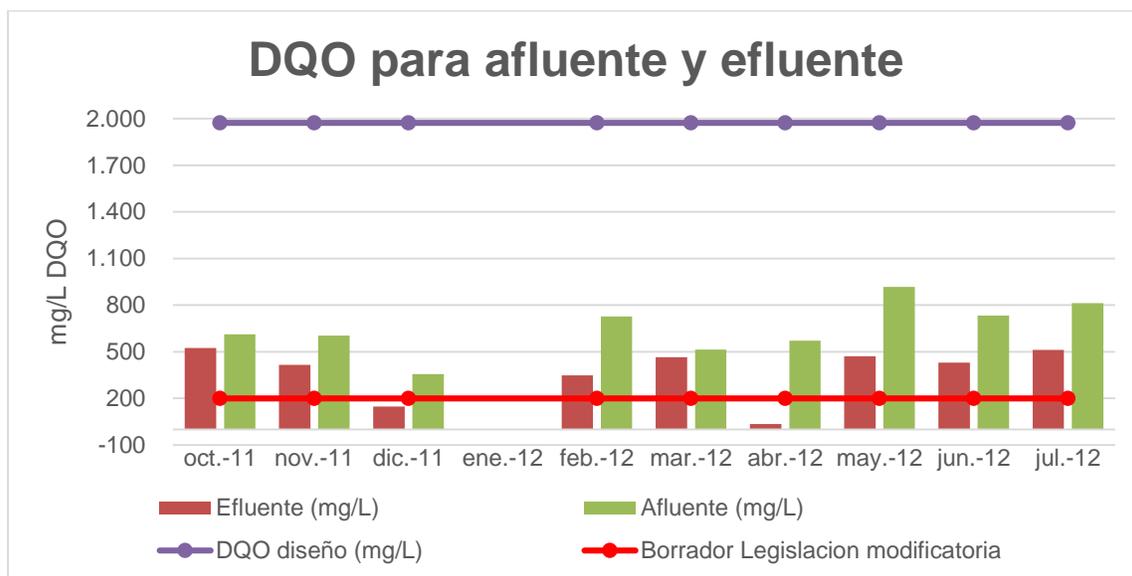


Figura 22. DQO afluente y efluente

El diseño de la PTAR contempla una carga en DQO de 7.671 kg/d y en la Figura 23 se observa que en la operación se registran cargas afluentes inferiores a las de diseño.

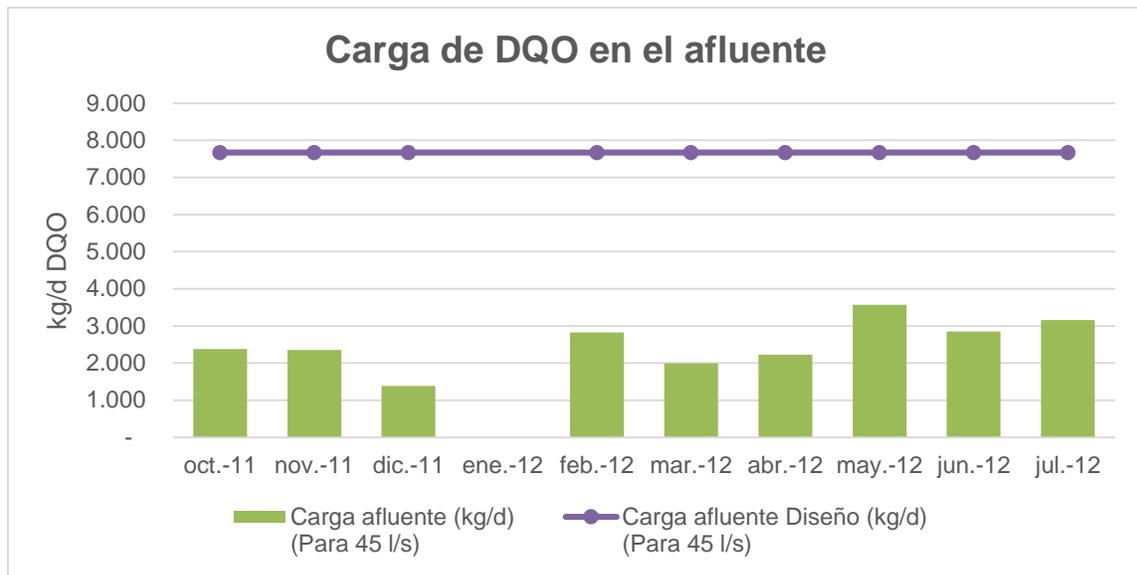


Figura 23. Carga DQO en el afluente

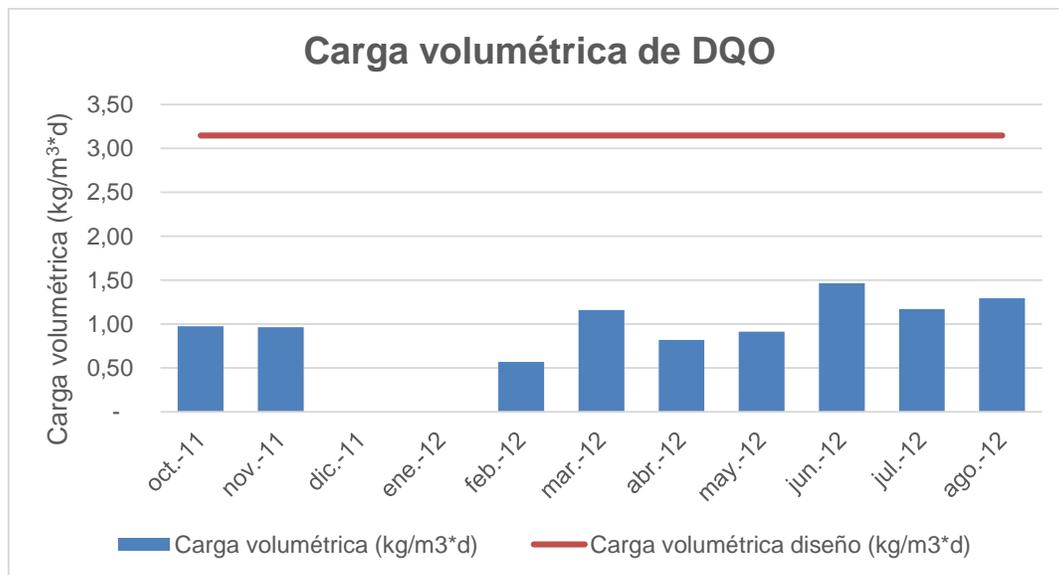


Figura 24. Carga volumétrica de DQO

Aunque las concentraciones de DQO del afluente, 650 ± 168 mg/L en promedio (Tabla 8), son altas para un agua residual doméstica, las cargas volumétricas sobre el RAP que son en promedio de $1,04 \pm 0,27$ kg/m³*d, no sobrepasan la carga volumétrica de diseño de 3,15 kg/m³*d (Figura 24).

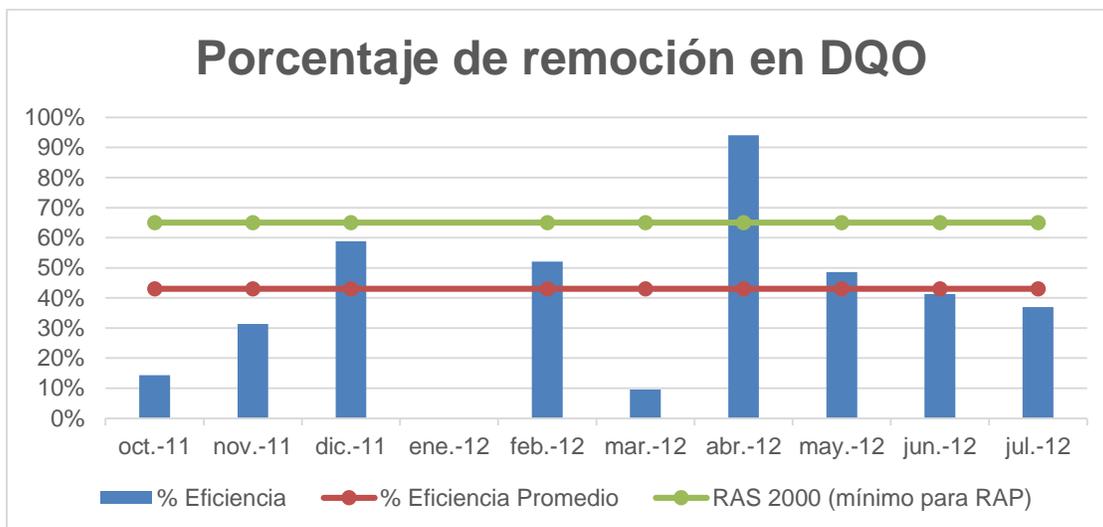


Figura 25. Porcentaje de remoción en DQO

6.3 SST

En la Tabla 9 y en la Figura 29 se puede observar que la remoción en SST sólo supera en el mes de Agosto de 2012 el 80%, valor requerido por el Decreto 1594/84. El valor promedio de remoción en SST es del 63% ± 15%, el cual no supera los valores para tratamiento secundario de agua residual doméstica; pero, cumple con el límite estipulado en el RAS 2000 (pág E.46) de 60 a 70%.

Tabla 9. Caracterización de SST PTAR Ubaté

PERIODO	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	% Eficiencia	Carga afluente (kg/d) (Para 45 L/s)	Carga efluente (kg/d) (Para 45 L/s)
oct-11	260	113	57%	1.011	439
nov-11	328	187	43%	1.275	727
dic-11	332	97,1	71%	1.291	378
ene-12	400	267	33%	1.555	1038
feb-12	517	112	78%	2.010	435
mar-12	480	187	61%	1.866	727
abr-12	415	147	65%	1.614	572
jun-12	680	174	74%	2.644	677
jul-12	457	168	63%	1.777	653
ago-12	757	113	85%	2.943	439
Promedio	485±114	157±52	63%±15%	1.799±483	609±200

Fuente: CONHYDRA (2012) .

En la Tabla 9 y Figura 26 se observa que los valores de SST en el afluente sobrepasan el valor de diseño de 289 mg/L; incluso algunos datos duplican dicho valor. Con respecto al borrador de resolución, se puede observar que la mayoría de valores de SST del efluente cumplen con el valor de la norma propuesta de 200 mg/L. Sin embargo, la eficiencia de remoción de SST es inferior al 80%.

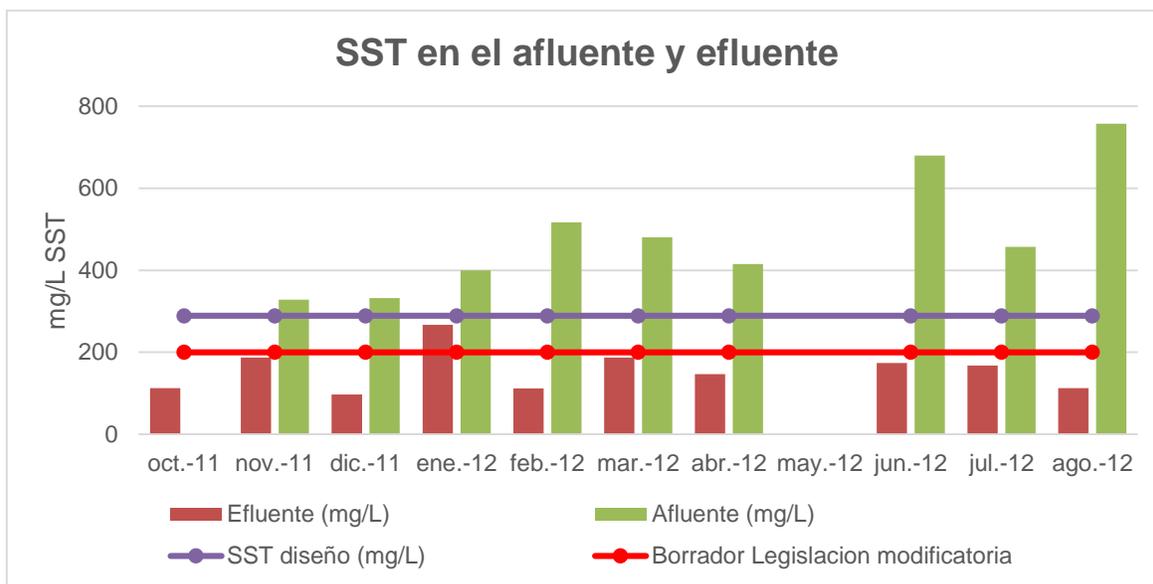


Figura 26. SST afluente y efluente

El diseño de la PTAR contempla una carga en SST de 1.123 kg/d para un caudal de 45 L/s. En la Figura 27 se observa que en la operación se registran cargas afluentes similares o superiores a las de diseño.

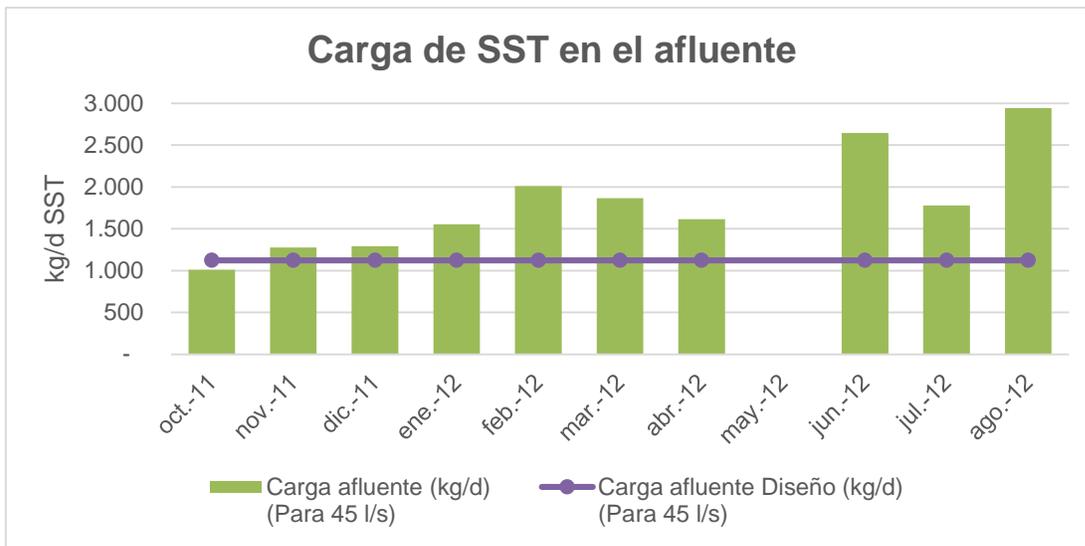


Figura 27. Carga SST afluente

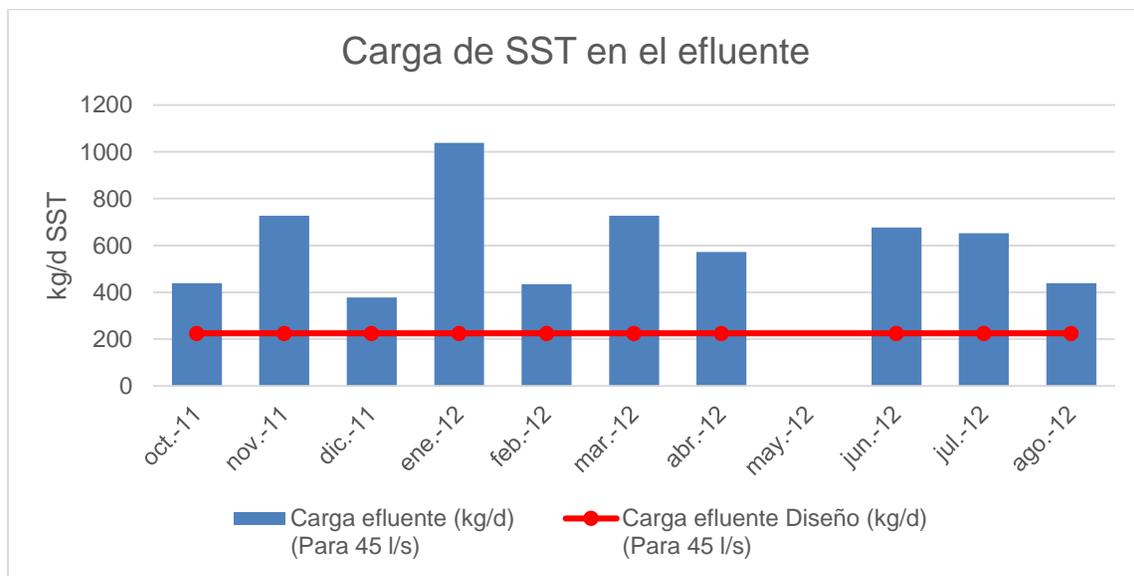


Figura 28. Carga SST en el efluente

Las concentraciones de SST del afluente, 485 ± 114 mg/L en promedio (Tabla 9), son altas para un agua residual doméstica.

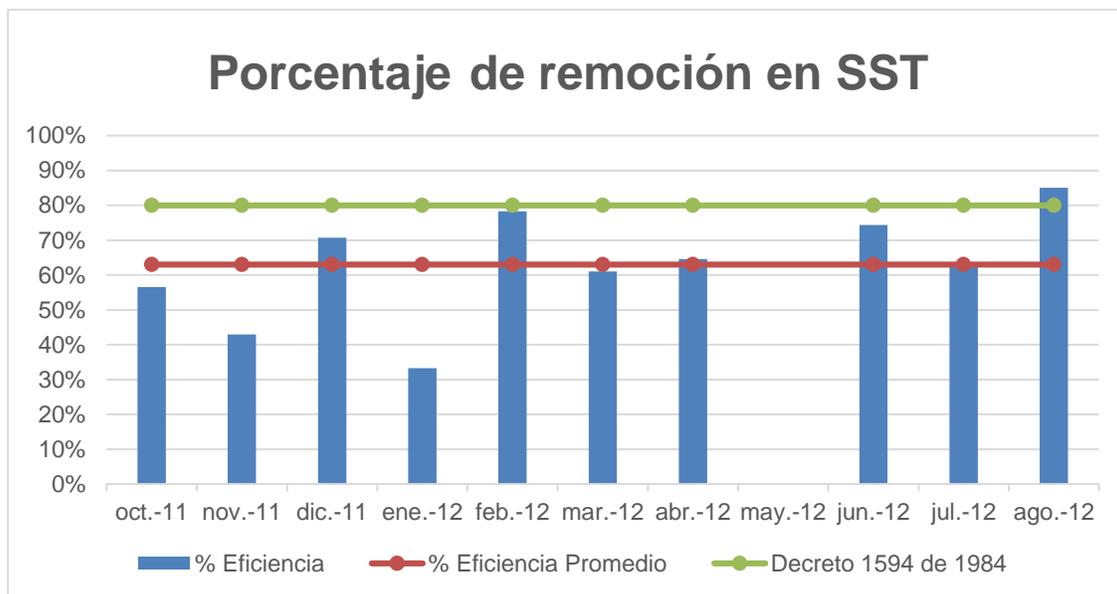


Figura 29. Porcentaje de remoción en SST

6.4 pH

Se presenta un pH promedio del afluente de $6,9 \pm 0,5$ y del efluente de $6,5 \pm 0,5$, los resultados obtenidos para este parámetro se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Caracterización del pH en la PTAR Ubaté

PERIODO	AFLUENTE	EFLUENTE
oct-11	7,0	6,0
nov-11	6,0	6,0
dic-11	6,0	6,0
ene-12	7,0	6,0
feb-12	7,0	7,0
mar-12	7,5	6,9
abr-12	6,8	6,0
may-12	6,7	6,8
jun-12	7,3	7,0
jul-12	7,1	6,6
ago-12	7,0	7,0
Promedio	$6,9 \pm 0,5$	$6,5 \pm 0,5$

Fuente: CONHYDRA (2012) .

En la Tabla 10 se puede observar que el pH del afluente y efluente se ubicó dentro del rango de 6 a 7,5 unidades, condición que cumple con el decreto 1594/84 y con el proyecto de resolución (5 a 9 unidades).

Según Romero (2012, 238), el pH óptimo en un proceso anaerobio es de 6 a 8, con un óptimo de 6,8 a 7,4. Los datos de la Tabla 10, indican que el pH es el adecuado. Sin embargo hay meses donde el pH es de 6,0 unidades, valor que puede ser muy ácido y podría afectar el proceso de metanogénesis, y por lo tanto, no completar afectivamente el proceso anaerobio.

6.5 Tiempo de Retención

De acuerdo con las condiciones de operación (Tabla 4), la PTAR opera el RAP con tiempos de retención de 11 a 15 horas con caudales de 45 a 60 L/s; valores considerados apropiados según el RAS 2000 de 8 - 10 horas.

Capítulo VII

Costos de la PTAR

Se determinan (Tabla 11) a partir de los datos obtenidos por la empresa administradora CONHYDRA. Los valores reportados hacen referencia al tratamiento de un caudal de 45L/s.

La proyección de costos se realiza a través de los costos determinados por CONHYDRA y en el IPC para Colombia.

Tabla 11. Costos de operación de la PTAR de Ubaté

Parámetro Base de Cálculo (Resolución 287 de 2004)	Ubaté 2011	Ubaté 2012	Ubaté 2013	Ubaté 2014
Datos Generales				
Población Estimada (habitantes)	23.527	24.101	24.648	25.461
Suscriptores Acueducto (Número)	7.207	7.383	7.550	7.799
Suscriptores Alcantarillado (Número)	6.157	6.307	6.450	6.663
Costos de Personal				
Costos de Personal 2011	\$15.527.797	\$15.906.675	\$16.267.757	16.804.593
Costos de Personal de Apoyo 2011	\$1.605.000	\$1.644.162	\$1.681.484	1.736.973
Total Costos de Personal	\$17.132.797	\$17.550.837	\$17.949.241	18.541.566
Costos de Operación y Mantenimiento				
Costos de Operación Mantenimiento y Herramienta Menor 2011	\$5.966.605	\$6.112.190	\$6.250.937	\$6.457.218
Servicio de Vigilancia (Dato suministrado CAR 2011)	\$57.782.504	\$59.192.397	\$60.536.065	62.533.755
Costo de Análisis de Laboratorio CAR (Dato suministrado CAR 2011)	\$6.872.250	\$7.039.933	\$7.199.739	7.437.330
Subtotal Costos de Operación y Mantenimiento	\$70.621.359	\$72.344.520	\$73.986.741	76.428.303
Costo de Energía Eléctrica de Operación (Dato suministrado CAR 2011)	\$17.200.698	\$17.620.395	\$18.020.378	18.615.050
TOTAL COSTOS ANUALES	\$104.954.854	\$107.515.752	\$109.956.360	\$113.584.920

En la Tabla 12 se presentan los costos de operación de la PTAR por metro cúbico de agua y por habitante.

Tabla 12. Resumen de costos de operación PTAR

Año	Caudal Tratado (m³/año)	Costo Anual	Costo/m³	Población	Valor/ habitante.año
2011	1.419.120	\$ 104.954.854	\$ 74	23.527	\$ 4.461
2012	1.419.120	\$ 107.515.752	\$ 76	24.101	\$ 4.461
2013	1.419.120	\$ 109.956.360	\$ 77	24.648	\$ 4.461

Fuente: CONHYDRA (2012)

Capítulo VIII

Conclusiones

- La PTAR analizada está constituida por una estación de bombeo, dos desarenadores un tanque de homogenización, cuatro reactores anaerobios flujo pistón (RAP), cuatro sedimentadores y cuadro lechos de secado.
- El diseño de la PTAR satisface los criterios formulados por el RAS 2000 para la cuantificación de este tipo de sistema de tratamiento.
- La información disponible analizada indica que la PTAR opera con caudales y cargas de DBO, DQO y SST superiores a los valores de diseño.

- La eficiencias de tratamiento observadas en la PTAR son, en promedio:

$$\text{DBO} = 43 \pm 13\%$$

$$\text{DQO} = 43 \pm 25\%$$

$$\text{SST} = 63 \pm 15\%$$

Los valores anteriores no satisfacen los requerimientos exigidos por la norma de vertimiento del decreto 1594 de 1984, del 80% para DBO, DQO y SST.

- El agua residual afluyente tiene caracterización de agua residual fuerte con las siguientes características promedio:

$$\text{DBO} = 454 \pm 117 \text{ mg/L}$$

$$\text{DQO} = 650 \pm 168 \text{ mg/L}$$

$$\text{SST} = 485 \pm 114 \text{ mg/L}$$

$$\text{pH} = 6,9 \pm 0,5$$

- El agua residual tratada presenta las siguientes características promedio:

$$\text{DBO} = 251 \pm 61 \text{ mg/L}$$

$$\text{DQO} = 372 \pm 170 \text{ mg/L}$$

$$\text{SST} = 157 \pm 52 \text{ mg/L}$$

$$\text{pH} = 6,5 \pm 0,5$$

Los valores anteriores corresponden a un agua residual doméstica municipal, confirmando que el efluente no cumple normas de vertimiento y que la PTAR no satisface la eficiencia propuesta.

- La temperatura de operación de la PTAR, inferior a 15°C, no es recomendable para el tratamiento anaerobio y confirma que el proceso depende, para su eficiencia, en gran proporción de la temperatura.
- Los costos de operación evaluados, \$74/m³ y \$4461/hab.año son costos mínimos de tratamiento y serían muy ventajosos al lograr las eficiencias requeridas.
- Se recomienda el control de: caudal, pH, DBO, DQO, SSV, SST, Grasas y Aceites, Alcalinidad, AV; temperatura, N amoniacal, sulfatos, sulfuros en el afluente, en el efluente y en el contenido del RAP, así como de la producción de lodos y de los periodos de secado, para así determinar posibles cambios en la operación que permitan obtener los rendimientos esperados de una PTAR de tratamiento secundario.

Capítulo IX

Referencias

- Alcaldía del Municipio de Ubaté (2012). Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ubaté – Cundinamarca. Oficina de servicios públicos
- Alcaldía del Municipio de Ubaté (2012). Planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ubaté. Oficina de servicios públicos
- Metcalf & Eddy (1995). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. 3ra edición.
- CONHYDRA (2012). Informe de caracterización y operación de la PTAR Ubaté.
- ROMERO, J (2012). Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Tercera reimpresión.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Versión 4.0 del proyecto de resolución de vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y alcantarillado público.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). RAS - Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. República de Colombia
- Congreso de la República de Colombia (1984). Decreto 1594/84. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Resolución 2273.
- Comisión de Regulación de Agua potable y saneamiento básico – CRA (2004). Resolución 287 de 2004. Por la cual se establece la metodología tarifaria para

regular el cálculo de los costos de prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado. Colombia.