

INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA RESIDUAL EN LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO: CASO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE JUAN DÍAZ, PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

INFLUENCE OF SEASONAL VARIATION ON THE EFFICIENCY OF POLLUTANT REMOVAL OF THE WASTEWATER TREATMENT PLANT LOCATED IN JUAN DIAZ, PANAMA CITY.

Autores

Elbis Soto, Prof. Asesor: Dra. Casilda Saavedra

Área

Licenciatura en Ingeniería Ambiental
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá

RESUMEN

Este trabajo estudia la influencia de la variación estacional de aguas residuales crudas en la eficiencia de remoción de contaminantes, tomando como caso de estudio la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Juan Díaz, la cual es parte del Proyecto de Saneamiento de la Ciudad y Bahía de Panamá. Se seleccionaron seis sitios de muestreo en el sistema de colectoras que conduce las aguas residuales a la planta. En cada sitio de muestreo se midió el caudal, se determinaron valores de parámetros físico-químico en campo y se tomaron muestras para análisis de parámetros físicoquímicos y biológicos en laboratorio. La mayoría de los resultados estuvieron dentro del rango especificado por las normas de aguas residuales de Panamá. Se encontró que los cambios en precipitación en la estación seca y lluviosa producen variaciones tanto en la cantidad como en la calidad de aguas residuales crudas y afecta la eficiencia de tratamiento o remoción de contaminantes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Juan Díaz. Este estudio se realizó con la colaboración de la Empresa Degremont, encargada de la operación y mantenimiento de la planta.

PALABRAS CLAVES

Aguas residuales, eficiencia, caudal, tratamiento, calidad de agua

ABSTRACT

This research studies the influence of seasonal variation on the efficiency of pollutant removal of the wastewater treatment plant located in Juan Diaz, Panama City. Six sites were selected for study, where physicochemical and biological wastewater parameters were measured. Most of the results were within the ranges set by the standard for liquid effluent discharge systems. It was found that changes in precipitation due to seasons produce variations in both quality and quantity of wastewater and influence the efficiency of treatment in the Juan Díaz wastewater treatment plant.

KEY WORDS

Wastewater, efficiency, flow, quality.

1. Introducción

La creciente expansión de la población en la ciudad de Panamá ha ocasionado problemas de contaminación de los ríos que atraviesan el área metropolitana y desembocan en la Bahía de Panamá; atentando contra la salud pública y calidad de vida de la población. Como consecuencia, a inicios del milenio se concretan los estudios y diseños para el Proyecto Saneamiento de la Bahía y Ciudad de Panamá, liderado por la Unidad Coordinadora del Proyecto (UCP), adscrita al Ministerio de Salud de Panamá (MINSA); a través del Plan Maestro Consolidado desarrollado desde el año 1998 hasta el 2001 aproximadamente. Este proyecto tiene el propósito de mejorar la calidad de vida de la población, el medio ambiente y las condiciones sanitarias de la ciudad de Panamá; a través de cuatro componentes, dentro de los cuales se encuentra un sistema de tratamiento de aguas residuales.

El sistema de tratamiento ha sido desarrollado en un área de 39.57 hectáreas (Ha), ubicado en el corregimiento de Juan Díaz, localizado al sur del Corredor Sur y al oeste de la desembocadura del río Juan Díaz. Inició operaciones formalmente el 12 de mayo de 2013, con una vida útil de 20 años para su primera etapa. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Juan Díaz tiene un caudal medio de diseño de 2.2 m³/s y 3.96 m³/s como caudal o flujo máximo horario; pero actualmente se genera un caudal promedio de 1.5 m³/s diariamente [1].

Esta planta utiliza un sistema de tratamiento biológico con la tecnología de lodos activados, con remoción biológica de nutrientes, para cumplir con la norma para descarga de efluentes líquidos directamente a cuerpos de agua superficiales. El proyecto además cuenta con distintas estaciones de bombeo, pozos y colectoras, encargados de recolectar y conducir las aguas residuales a la planta de tratamiento para la depuración de las mismas.

La eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales puede verse afectada por la influencia de diversos factores, incluyendo los cambios en precipitación y escurrimiento

superficial en las estaciones seca y lluviosa. Con el fin de determinar la influencia de estos cambios estacionales en la eficiencia de remoción de contaminantes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Juan Díaz, esta investigación se enfoca en analizar la calidad de agua cruda en los siguientes: Estación de Bombeo de ATLAPA, Interceptor Costero (Estación de Bombeo N°2 y N°3), Pozo de Interconexión Vía Brasil, Colectora Matías Hernández (MH) y Túnel Interceptor (TI). En cada sitio se estudia por un período de cuatro semanas, cómo las variaciones estacionales, que producen cambios en los caudales y calidad del agua residual, influyen en la eficiencia de remoción de contaminantes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Juan Díaz.

Esta influencia puede reflejarse en los análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos de las aguas residuales; así como en el caudal de las mismas. Para ello, se presentan la metodología, análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones, a fin de contribuir a mejorar la eficiencia de los procesos llevados a cabo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Juan Díaz.

2. Metodología de muestreo

El muestreo no es más que el procedimiento de escoger parte de un elemento, el cual debe ser representativo del mismo, de manera que no afecte los resultados que se obtienen en sus análisis [2]. Para garantizar la confiabilidad de estos resultados, es determinante conocer el alcance u objeto del estudio, así como las variaciones fisicoquímicas y biológicas que se producen durante el muestreo; por lo que se hace necesaria la elaboración de un plan de muestreo.

Este plan de muestreo debe enmarcar los aspectos a tomar en cuenta para la frecuencia, número y obtención de la muestra, lugar de muestreo, período de muestreo; entre otras. Se deben incluir además, materiales y equipos, equipo de seguridad, técnicas de muestreo, tipo de muestras, procedimiento de muestreo, mediciones de flujo, preservación y cadena de custodia de la muestra [3, 4].

Para efectos de esta investigación, el instructivo utilizado como base para definir el plan de muestreo fue el documento “Planificación de muestreo y análisis”, proporcionado por el laboratorio interno de Degremont S.A.; empresa encargada de la operación y mantenimiento de la PTAR y que contiene los lineamientos y recomendaciones para el muestreo de aguas residuales crudas. Este instructivo se apoya en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 39-2000 “Agua. Descarga de efluentes líquidos directamente a sistemas de recolección de aguas residuales” y el *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater*, en su última edición. Esta norma “establece las características que deben cumplir los vertidos de efluentes líquidos provenientes de actividades domésticas, comerciales e industriales, a los sistemas de recolección de aguas residuales” [4]. A continuación se presenta la metodología utilizada tanto para muestreo de agua residual cruda como para la obtención del caudal de la misma.

2.1 Selección de los puntos de muestreo

La revisión de la cobertura del sistema de acueducto y alcantarillado, así como sus condiciones, deben realizarse previo a la selección de los sitios de muestreo [5]. Además, se deben incluir visitas al sitio y mapas o dibujos, es para la correcta selección de los sitios de muestreo [6].

En este sentido se seleccionaron seis sitios, ubicados en Urbanización Chanis (MH y TI), Cinta Costera (EB-2 y EB-3), ATLAPA y Vía Brasil. La información proporcionada por INGEMAR Panamá en el Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) del Proyecto Saneamiento de la Bahía y Ciudad de Panamá, permitió identificar estos sitios y la accesibilidad a los mismos.

2.2 Materiales y métodos de muestreo

Los análisis fisicoquímicos y biológicos de agua residual cruda, incluyeron la recolección de la muestra para todos los sitios. Los parámetros seleccionados son los recomendados por el reglamento técnico “DGNTI-COPANIT 39-2000” para la toma de muestras de agua residual doméstica. En el caso de esta investigación

se determinó al inicio que se cumplirían los objetivos de la investigación con la inclusión de los siguientes parámetros: pH, temperatura, conductividad, turbidez, DBO5, DQO, SST y CF. Cabe destacar que son muchos más; sin embargo solo se presentan los que involucra nuestro caso de estudio, pues la selección de los parámetros varía en conformidad del objeto del estudio y la disponibilidad de captación de la muestra en el sitio.

La metodología para la recolección de la muestra se ajustó a las condiciones y accesibilidad de cada sitio. Para la recolección de la muestra de agua residual cruda en la colectora Matías Hernández y Túnel Interceptor, se utilizó una cubeta de plástico rígido porque el agua provenía de un grifo. En Interceptor Costero (EB-2 y EB-3) y la Estación de Bombeo de ATLAPA la muestra fue recolectada con una cubeta plástica atada a una cuerda, pues el flujo de agua se encontraba al fondo de una cámara especial de aproximadamente seis a ocho metros de profundidad (ver figura 1). En el Pozo de Interconexión de Vía Brasil, la muestra fue recolectada por los operadores de la planta de tratamiento de Juan Díaz, debidamente capacitados y autorizados para acceder al lugar, pues éste presenta condiciones de sitio confinado.



Figura 1. Recolección de muestra.

Una vez recolectada la muestra de agua residual, se procedía a la rápida medición de los parámetros in situ para evitar alteración de los resultados. Luego se trasvasaba el agua cruda a los envases plásticos y de vidrio proporcionados por el laboratorio encargado de los análisis.

Tabla 1. Frecuencia de muestreo

| Frecuencia | Parámetros de medición | |
|-----------------------|---|--------------------------|
| | In situ | De laboratorio |
| Tres veces por semana | pH Temperatura Conductividad Turbiedad | DQO DBO5 SST CF |

En la Tabla 1, puede observarse la frecuencia de muestreo y los parámetros fisicoquímicos y biológicos de agua residual medidos tanto in situ como en laboratorio. La frecuencia se dio en días intercalados; a excepción del día domingo, para un período de cuatro semanas.

Debido a que las técnicas de muestreo involucran la forma manual y automática [7], en este estudio se llevó a cabo la obtención de la muestra de forma manual, pues los sitios seleccionados así lo permitían. Tomando en cuenta además, que la muestra recolectada fue simple.

Durante todo el período de muestreo, las muestras fueron preservadas en una hielera, tal como lo muestra la Figura 2. Los envases o frascos de muestras que requerían análisis de laboratorio, contenían preservantes previamente preparados por el laboratorio.



Figura 2. Preservación de la muestra.

2.3 Medición de caudal de agua residual

La correcta y eficaz medición de flujo o caudal dependerá en gran parte del sitio de muestreo, ya sea por su accesibilidad o facilidad de realizar dicha medición.

Por esta razón la Tabla 2, presenta la metodología de obtención del caudal de agua residual para cada sitio seleccionado.

Tabla 2. Metodología de medición de caudal

| Sitios de muestreo | Metodología |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Matías Hernández y Túnel Interceptor | Medidor ultrasónico 93 P: |
| EB-ATLAPA | Volumen - Tiempo |
| Pozo de Interconexión Vía Brasil | Velocidad - Área |
| Interceptor Costero (EB-2 y EB-3) | Data de Placa |

La medición de caudal en el pozo de Vía Brasil no pudo efectuarse. El mismo es un área confinada en la que el oxígeno es limitado, y por medidas de seguridad el acceso al lugar es restringido a personal externo no capacitado.

El Medidor Ultrasónico 93 P es un sistema de medición ultrasónica de caudal, utilizado únicamente para obtener el flujo o caudal de líquidos en tuberías cerradas; siempre y cuando la tubería esté llena, con el fin de evitar acumulaciones de bolsas de aire en su interior. La instalación del equipo puede darse de manera horizontal o vertical, dependiendo de las posiciones de las tuberías.

La Figura 3 permite identificar las condiciones del sistema de tuberías en Túnel Interceptor (TI) y Matías Hernández (MH), por lo que la instalación del equipo se hace de manera horizontal. Esta instalación consigue que las acumulaciones de aire en la parte superior de la tubería y la formación de sedimentos en su parte inferior tengan una influencia menor sobre las mediciones [8].



Figura 3. Sistema de tuberías. TI (arriba), MH (abajo).

Luego de seleccionada la forma de instalación, se hace necesario cumplir con una serie de pasos de acuerdo al manual de instrucciones abreviado *Proline Prosonic Flow 93 P*. Estos incluyen determinación del diámetro y área transversal o de la sección de la tubería, que introducidos en el sistema nos darán el valor de la distancia a la que será necesario fijar los cables de metal alrededor de la tubería. Esto nos permite colocar las abrazaderas y a su vez los sensores, cubriendo la superficie de contacto con una capa uniforme de gel de acoplamiento. Finalmente, pueden conectarse los sensores al transmisor mediante los cables de conexión. Terminado este proceso, el equipo empieza a medir, visualizándose los distintos valores y variables de estado, tal como lo muestra la Figura 4.



Figura 4. Medidor Ultrasónico 93 P.

De este modo, la obtención de los caudales se realizaba cada diez segundos por un lapso de 1:30 minutos. De dichos datos se obtuvo un promedio; que luego se multiplicaría por el número de bombas que estaban funcionando en cada sitio al momento de realizada la medición. El método volumen-tiempo, consiste en medir el volumen del fluido que se descarga en un período especificado. Para el caso de la EB de ATLAPA, con las dimensiones de la cámara se obtuvo el área de la misma, además de los cambios de niveles registrados por el panel de control al apagar todas las bombas, que

permitían obtener la altura de agua cruda (ver Figura 5). Esta altura multiplicada por el área de la cámara permitía obtener el volumen. Esto se realizaba en un tiempo establecido de 1:30 minutos con una frecuencia de medición de cada diez segundos.



Figura 5. Cámara de conducción y Panel de control de bombas.

Por último, con la metodología de Data de placa en Interceptor Costero, se hizo necesario medir el tiempo de encendido y apagado de las bombas localizadas en el fondo de las cámaras colectoras de agua cruda; a través de los paneles de control presentados en la Figura 6. Con dichas diferencias de tiempo, se obtenía un promedio para luego multiplicarlo con el caudal de capacidad de la bomba.



Figura 6. Panel de control de bombas.

Este caudal de capacidad de la bomba se obtiene de los manuales de operación que reposan en el proyecto de Saneamiento de la Bahía y Ciudad de Panamá, información proporcionada por Degremont S.A. De este modo se obtuvo el caudal de agua cruda para las estaciones de bombeo de cinta costera (EB-2 y EB-3).

2.4 Análisis de las muestras

La calidad del agua residual, es determinada a través de una serie de análisis de laboratorio y de campo, donde cualitativamente y cuantitativamente se conocen las características físicas, químicas y biológicas que pueden afectar el tipo y grado de tratamiento [9].

Esta investigación tiene como objetivo analizar la calidad de las aguas crudas que llegan a las estaciones de bombeo del Proyecto Saneamiento de la Bahía y Ciudad de Panamá. Dicha calidad se determinará a través de parámetros fisicoquímicos y biológicos, seleccionados previamente.

3. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el estudio, así como los análisis correspondientes a cada uno de ellos. Estos se presentarán de la siguiente forma: Parámetros físicos, químicos y biológicos por sitio de muestreo; relaciones entre parámetros fisicoquímicos; caudal por sitio de muestreo y parámetros fisicoquímicos en función del caudal.

Parte importante en el análisis de estos resultados se basa en el conocimiento de datos meteorológicos de precipitación y temperatura, por lo que se ha seleccionado una estación meteorológica de acuerdo a las características y área de cobertura de dicha estación para con nuestros sitios seleccionados. Esta estación fue la Estación Meteorológica de Albrook.

En la Tabla 3 se presenta la información de precipitación y temperatura proporcionada por la Autoridad de Aeronáutica Civil (AAC) para el período de muestreo.

Tabla 3. Datos de precipitación y temperatura

| Número de muestreo | Fecha de muestreo | Precipitación (mm de lluvia) | Temperatura (°C) |
|--------------------|-------------------|------------------------------|------------------|
| | | Albrook | Albrook |
| 1 | 23/04/2014 | 0 | 29,6 |
| 2 | 25/04/2014 | 1 | 27,5 |
| 3 | 28/04/2014 | 0,8 | 28,7 |
| 4 | 29/04/2014 | 0 | 30,4 |
| 5 | 02/05/2014 | 0,8 | 28,8 |
| 6 | 05/05/2014 | 47,4 | 30 |
| 7 | 07/05/2014 | 0 | 28 |
| 8 | 09/05/2014 | 5,5 | 29,2 |
| 9 | 10/05/2014 | 89,7 | 28,1 |
| 10 | 13/05/2014 | 1 | 29,3 |
| 11 | 15/05/2014 | 6,7 | 27,8 |
| 12 | 17/05/2014 | 0 | 28,9 |

La clasificación que hace la Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA), para la precipitación según su intensidad de acuerdo a distintos rangos se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4. Clasificación de la precipitación

| Nombre | Desde (mm) | Hasta (mm) |
|-----------|------------|------------|
| Seco | 0.0 | 0.5 |
| Débil | 0.6 | 3.0 |
| Ligeras | 3.1 | 10.0 |
| Moderadas | 10.1 | 25.0 |
| Fuertes | 25.1 | 75.0 |
| Extremas | 75.1 | 300.0 |

3.1 Parámetros físicos, químicos y biológicos por sitio

Tal como se indica en la sección 2.1, los sitios a analizar son: Estación de bombeo N.º2 (EB-2), Estación de bombeo N.º3 (EB-3), Vía Brasil, ATLAPA, Matías Hernández (MH) y Túnel Interceptor (TI). Los resultados se presentan en el siguiente orden: pH, temperatura, conductividad, turbidez, DBO5, DQO, SST y CF. Además se presenta el análisis de la eficiencia de remoción tomando en cuenta el coeficiente de

correlación de Pearson. Estos análisis se basan en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 39-2000.

Para el caso de los parámetros pH, temperatura y conductividad, los valores se medían en campo con un medidor multiparámetro (ph-metro), mientras que la turbidez se medía con un turbidímetro; estos obtenidos inmediatamente después de recolectada la muestra. El resto de los parámetros se obtenían por parte de análisis de laboratorio (ver Tabla 1).

3.1.1 pH

Los valores típicos de pH entre 6.5 y 8.5 evitan la interferencia en los procesos biológicos de aguas residuales [10]. A pesar de que el último día resultó un valor de 8.92 para la EB-2 y valores de 5.9 para ciertos días de muestreo en algunos sitios, la norma establece un rango de límite máximo permisible (L.M.P.) de 5.5 a 9 unidades de pH, cumpliéndose este requisito para todos los días de muestreo en nuestros sitios.

3.1.2 Temperatura

Variaciones de temperatura en valores altos o bajos, pueden producir interferencia en los procesos de tratamiento biológicos [2, 11]. La norma establece una variación de ± 3 °C sobre la temperatura normal del sitio. El menor valor fue de 28.3 °C para MH y EB-3; mientras que el valor más alto lo presentó EB-3 (31.1 °C). En este sentido, a pesar de que la temperatura disminuyó en todos los sitios el segundo día de muestreo, todos los datos estuvieron dentro de este rango.

3.1.3 Conductividad

Algunos de los sitios muestreados sobrepasaron el límite establecido en la norma, el cual es de 2000 $\mu\text{mho/cm}$. El noveno día en que se registró la mayor precipitación según la EM de Albrook (89.7 mm de lluvia), todos los valores de conductividad disminuyeron; siendo 282 $\mu\text{mho/cm}$ el valor más bajo, en el sitio de MH. No obstante, para la EB-3 los valores de conductividad eléctrica pudieron ser más elevados. Sin embargo, el aparato utilizado (ph-metro) solo registra un valor máximo de 3999 $\mu\text{mho/cm}$. Los valores siempre fueron altos en

EB-2 y EB-3 por la posible intrusión de agua de mar, pues ambas estaciones están construidas muy cerca de la Bahía de Panamá.

Desde el punto de vista de la temperatura (ver Tabla 3); el primer, cuarto y sexto día todos los sitios de muestreo registraron valores de conductividad bajos, mientras que la temperatura del agua residual fue de 29 ° a 30 °C en todos los sitios.

3.1.4 Turbidez

Los valores para los cuatro primeros días de muestreo no se tomaron en cuenta por defectos del equipo al momento de obtenida la muestra de agua residual. Podemos destacar que para los días en que se registraron fuertes precipitaciones (sexto y noveno día de muestreo), la turbidez disminuyó en la mayoría de los sitios. Esto indica que hay intrusión de aguas pluviales en el sistema sanitario y evidentemente la lluvia jugó un papel importante en la dilución del agua residual.

El quinto día se registró la mayor turbidez en Túnel Interceptor (160 NTU), hecho que reposa en nuestra cadena de custodia externa para ese día; mientras que el valor más bajo fue de 25.8 NTU en la EB-2. El reglamento técnico DGNTI-COPANIT 39-2000 no establece límites para este parámetro.

3.1.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)

El primer dato obtenido en la EB-3 fue despreciado, ya que su valor era extremadamente alto y pudo haberse dado a errores en el dato. El menor valor fue de 42.0 mg/l para TI y el mayor de 885 mg/l para EB-3; sin embargo, la norma no presenta valores máximos permisibles para este parámetro.

Comparando los resultados de DBO5 con los datos de precipitación, fue notable que para el tercer y cuarto día de muestreo se registraran las mayores concentraciones de DBO5 y la precipitación fue entre seca y débil (ver Tabla 3 y Tabla 4).

3.1.6 Demanda química de oxígeno (DQO)

Al igual que el parámetro anterior, el primer

dato también fue despreciado. Generalmente al determinar la cantidad de DQO en un agua residual se espera que los resultados sean mayores a los de DBO5 [2]. La norma DGNTI-COPANIT 39-2000 indica que la concentración de DQO debe ser de 1.25 a 2.5 mayor que la DBO5 y todos los resultados estuvieron dentro de este rango. Esta norma también establece un L.M.P. para DQO en 700 mg/l, hecho que se incumplió para el tercer y cuarto día de muestreo en que las concentraciones estuvieron arriba de mil miligramos por litro en todos los sitios y último día de muestreo para la EB-3 (1742 mg/l).

3.1.7 Sólidos suspendidos totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales pueden afectar los procesos de control biológico y físico cuando sus valores sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos. Ningún sitio sobrepasó el límite máximo establecido por la norma DGNTI-COPANIT 39-2000 (1500 mg/l), pues la mayor concentración fue de 150 mg/l en Túnel Interceptor; mientras que la menor concentración (5 mg/l) se presentó en MH y TI el noveno día en que hubo una precipitación extrema de 89.7 mm de lluvia según datos registrados por la EM de Albrook (ver Tabla 3).

Las concentraciones de SST disminuyeron para los días en que se presentaron precipitaciones dentro del rango de débiles a fuertes.

3.1.8 Coliformes fecales (CF)

Nuestra norma establece un L.M.P. de 106 NMP/100ml para coliformes fecales. Estos valores sobrepasaron el límite, pues el menor dato fue de 1.0E+4 y el mayor fue de 4.6E+6. Cabe resaltar que el séptimo día (a excepción de TI) y décimo día todos los sitios marcaron la misma concentración de coliformes fecales (2.0E+6).

3.1.9 Eficiencia de remoción

Los datos de eficiencia de remoción fueron proporcionados por Degrémont S.A. sólo para los parámetros DQO y SST mencionados en la Tabla 5. La información de precipitación fue proporcionada por AAC para la estación meteorológica de Albrook.

Tabla 5. Eficiencia de remoción y datos de precipitación

| Número de muestreo | Eficiencia de remoción (%) | | Precipitación (mm de lluvia) |
|--------------------|----------------------------|-----|------------------------------|
| | DQO | SST | EM Albrook |
| 1 | 84 | 91 | 0 |
| 2 | 81 | - | 1 |
| 3 | 90 | 86 | 0,8 |
| 4 | 89 | 80 | 0 |
| 5 | 88 | 77 | 0,8 |
| 6 | 91 | - | 47,4 |
| 7 | 86 | - | 0 |
| 8 | 88 | - | 5,5 |
| 9 | 88 | 92 | 89,7 |
| 10 | 91 | 88 | 1 |
| 11 | 92 | 90 | 6,7 |
| 12 | 90 | 91 | 0 |

El porcentaje de eficiencia de remoción fue bastante alto para ambos parámetros durante todo el período de muestreo. De los sitios de muestreo el que presentó mayor concentración de SST fue Túnel Interceptor (TI). Esto se registró el quinto día y la eficiencia de remoción fue más baja.

Tomando en cuenta la precipitación, el mayor porcentaje de remoción de SST se dio el noveno día en que se registró la mayor precipitación (89,7 mm de lluvia) según la EM de Albrook. A pesar de que las mayores concentraciones de DQO se dieron el tercer y cuarto día, el porcentaje de eficiencia de remoción fue bastante alto.

Esta relación de la eficiencia de remoción con la precipitación puede observarse en la Tabla 6 y Tabla 7 a través del coeficiente de correlación de Pearson. El valor obtenido de este coeficiente, es un índice que mide el grado de covariación entre variables que están relacionadas linealmente.

Tabla 6. Coeficiente de correlación de Pearson de DQO vs precipitación

| | DQO | EM Albrook |
|------------|--------|------------|
| DQO | 1 | |
| EM Albrook | 0,1455 | 1 |

Tabla 7. Coeficiente de correlación de Pearson de SST vs precipitación

| | SST | EM Albrook |
|------------|--------|------------|
| SST | 1 | |
| EM Albrook | 0,3877 | 1 |

Basándonos en la interpretación literal del coeficiente de correlación de Pearson, el índice varía en el intervalo [0-1] [12]. Podemos decir entonces que tanto para la DQO como los SST la correlación es positiva con la EM Albrook. En este sentido, la influencia de la variación estacional fue notable para ambos parámetros durante todo el período de muestreo.

3.2 Relaciones entre parámetros fisicoquímicos por sitio

En este apartado se analizarán las relaciones tanto de DQO como de SST, ambas en función de DBO5 para cada sitio seleccionado.

Estas relaciones actúan como indicadores en los procesos de tratamiento, pues permiten identificar la capacidad de degradación biológica que tienen las aguas residuales en la planta de tratamiento.

3.2.1 Relación DQO/DBO5

Se establece una relación DQO/DBO5 de 1.25 a 2.5 como límite máximo [2, 4]. En la Figura 7 se demuestra que esta relación se ha mantenido para todos los sitios durante todo el período de muestreo.

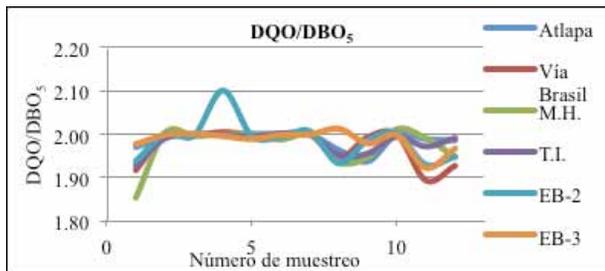


Figura 7. Relación DQO/DBO5.

3.2.2 Relación SST/DBO5

Según la Tabla 8, a mayor o proporción de SST/DBO5 habrá mayor cantidad de materia orgánica necesaria para que las bacterias puedan llevar a cabo su trabajo de manera óptima y poder obtener así una alta eficiencia en los procesos que se realizan para tratar el agua residual.

Tabla 8. Proceso de lodos activados

| Clasificación de procesos de lodos activados | | | |
|--|---|---|------------------|
| Tipo | F/M proporción (kg DBO ₅ · kg ⁻¹ VS · d ⁻¹) | DBO cargamento kg DBO ₅ · m ³ · d ⁻¹) | Promedio HRT (h) |
| Carga muy alta | >1.5 | >3 | 1.00 |
| Carga alta | 0.5 a 1.5 | 1.5 a 3 | 2.40 |
| Carga media | 0.25 a 0.5 | 0.7 a 1.5 | 4.00 |
| Carga baja | 0.1 a 0.25 | 0.3 a 0.7 | 8.00 |
| Carga muy baja | <0.1 | <0.3 | 20.00 |

Fuente: Degrémont S.A.

Dicho esto, podemos decir que la mayor proporción la obtuvo el sitio de Matías Hernández (MH) el cual fue de 0.91 para el primer día de muestreo, entrando en el intervalo de carga alta; mientras que el valor más bajo (0.01) lo presentó el sitio de EB-3 para el mismo día en el rango de carga muy baja.

Sin embargo, existe la coincidencia de que en el tercer día de muestreo en todos los sitios la razón resultante dio una carga muy baja de materia orgánica en cuanto a los lodos activados se refieren. Para el resto de los días de muestreo las relaciones de SST/DBO5 arrojan valores dentro del rango de una carga media.

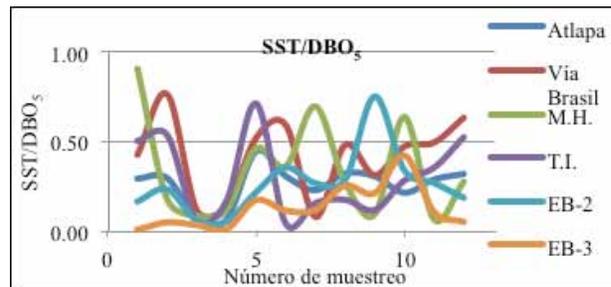


Figura 8. Relación SST/DBO5.

Esta relación permite determinar la cantidad de microorganismos que ingresan a la planta de tratamiento de aguas residuales; por lo que las bacterias tendrán materia orgánica disponible para biodegradar. De ello depende la eficiencia de remoción de los contaminantes de agua residual en los procesos de tratamiento.

3.3 Caudales por sitio

Los registros de caudales para cada sitio son presentados en la Tabla 9. Estos sitios de medición de caudal son los siguientes: Estación de bombeo N.º2, Estación de bombeo N.º3, ATLAPA, Matías Hernández (MH) y Túnel Interceptor (TI). Como se mencionó anteriormente, es fundamental resaltar que en el sitio de Vía Brasil no pudo obtenerse el caudal por razones de seguridad, al presentar éstas condiciones de espacio confinado.

Tabla 9. Registro de caudales para cada sitio

| N.º de muestreo | Fecha de Muestreo | Q (m3/h) | | | | |
|-----------------|-------------------|----------|------|-------|------|------|
| | | ATLAPA | MH | TI | EB-2 | EB-3 |
| 1 | 23/04/2014 | 309,02 | 45,6 | 81 | - | - |
| 2 | 25/04/2014 | 77,26 | 42,6 | 66,6 | - | - |
| 3 | 28/04/2014 | - | 40,8 | 49,8 | 1443 | 19 |
| 4 | 29/04/2014 | 77,26 | 39 | 46,8 | 333 | 47 |
| 5 | 02/05/2014 | 231,77 | 58,2 | 56,4 | 167 | 47 |
| 6 | 05/05/2014 | 309,02 | 29,4 | 77,4 | 777 | - |
| 7 | 07/05/2014 | 193,14 | 35,4 | 108,6 | 722 | 38 |
| 8 | 09/05/2014 | 579,42 | 36 | 132,6 | 777 | 28 |
| 9 | 10/05/2014 | - | 45,6 | 76,2 | 2200 | - |
| 10 | 13/05/2014 | - | 30,6 | 67,8 | 389 | 19 |
| 11 | 15/05/2014 | 180,26 | 30,6 | 64,2 | - | 66 |
| 12 | 17/05/2014 | 405,59 | - | - | 389 | 95 |

Los datos faltantes en la tabla 9 corresponden a los días en los que las bombas no se apagaban, para el caso de EB-2 y EB-3, por lo cual no fue posible la toma de valores de los tiempos necesarios para el cálculo de los caudales. En el caso de la Estación de Bombeo de ATLAPA, no se pudieron obtener los valores porque el nivel de agua cruda de la cámara colectora de este sitio no descendía, dificultando la medición de niveles. En cuanto a MH y TI para el último día los datos registrados por el equipo no fueron confiables.

Durante todo el período de muestreo la mayor precipitación fue de 47,4 y 89,7 mm de lluvia según la EM de Albrook. Su influencia fue notable sobre los caudales registrados en todos los sitios de medición durante el período de muestreo; pues cuando los registros de precipitación fueron nulos o casi nulos, los caudales registrados también fueron bajos.

Desde el punto de vista de los caudales de diseño para cada estación de bombeo o colectora, los caudales estuvieron por debajo de los de diseño. En el caso de la EB-2 tiene una capacidad de manejar aproximadamente 1.856 m3/s (6681.6 m3/h) y el mayor registro fue de 2220 m3/h. En cuanto a la EB-3, los registros de caudales estuvieron muy por debajo de los caudales de capacidad del sitio, pues esta estación tiene una capacidad para recibir un caudal de 0.153 m3/s (550.8 m3/h) con una bomba de capacidad de 568.8 m3/h; y el mayor valor de caudal fue de 66 m3/h.

3.4 Parámetros fisicoquímicos en función del caudal

Los parámetros fisicoquímicos (DBO5, DQO y SST) son analizados en función del caudal para cada sitio de muestreo. El objetivo de esto es cuantificar la carga orgánica presente en el agua residual; que se define como la cantidad de contaminación que se genera en un determinado volumen de agua residual durante un día. Esta carga orgánica (CO) se da en el producto de la concentración por el caudal DBO5*Q (tabla 10); DQO*Q (tabla 11) y SST*Q (tabla 12) en unidades de kg/día tal como se describe a continuación.

3.4.1 Demanda bioquímica de oxígeno en función del caudal

La demanda bioquímica de oxígeno se emplea para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales tratadas y sin tratar, tanto municipales como industriales que son biodegradables.

Tabla 10. Carga orgánica en términos de DBO5

| N.º de muestreo | Fecha de Muestreo | CO (kg/día) | | | | |
|-----------------|-------------------|-------------|-----|-----|-------|------|
| | | ATLAPA | MH | TI | EB-2 | EB-3 |
| 1 | 23/04/2014 | 1611 | 86 | 392 | - | - |
| 2 | 25/04/2014 | 276 | 55 | 166 | - | - |
| 3 | 28/04/2014 | - | 699 | 957 | 26805 | 19 |
| 4 | 29/04/2014 | 1421 | 683 | 903 | 5850 | 47 |
| 5 | 02/05/2014 | 1001 | 198 | 284 | 769 | 47 |
| 6 | 05/05/2014 | 1112 | 50 | 213 | 2517 | - |
| 7 | 07/05/2014 | 649 | 145 | 331 | 2324 | 38 |
| 8 | 09/05/2014 | 2402 | 93 | 325 | 2461 | 28 |
| 9 | 10/05/2014 | - | 56 | 77 | 3676 | - |
| 10 | 13/05/2014 | - | 103 | 241 | 1316 | 19 |
| 11 | 15/05/2014 | 753 | 84 | 268 | - | 66 |
| 12 | 17/05/2014 | 1343 | - | - | 1098 | 95 |

Según la Tabla 10, la Estación de bombeo de ATLAPA y la EB-2 fueron los que presentaron mayores valores de carga contaminante. El tercer día de muestreo la EB-2 fue la que registró mayor cantidad de carga contaminante.

3.4.2 Demanda química de oxígeno en función del caudal
La demanda química de oxígeno es utilizada para comprobar la carga orgánica que inhibe la actividad de los microorganismos en las aguas residuales. En este caso, la carga orgánica en términos de DQO fue muy superior en comparación con la DBO5, presentando valores bastante elevados para el sitio de EB-2, como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 11. Carga orgánica en términos de DQO

| N.º de muestreo | Fecha de Muestreo | ATLAPA | MH | TI | EB-2 | EB-3 |
|-----------------|-------------------|--------|------|------|-------|------|
| CO (kg/día) | | | | | | |
| 1 | 23/04/2014 | 3174 | 160 | 754 | - | - |
| 2 | 25/04/2014 | 551 | 111 | 331 | - | - |
| 3 | 28/04/2014 | - | 1396 | 1915 | 53506 | 752 |
| 4 | 29/04/2014 | 2841 | 1366 | 1805 | 12283 | 1642 |
| 5 | 02/05/2014 | 2002 | 397 | 567 | 1535 | 281 |
| 6 | 05/05/2014 | 2225 | 99 | 427 | 5016 | - |
| 7 | 07/05/2014 | 1298 | 290 | 662 | 4661 | 357 |
| 8 | 09/05/2014 | 4717 | 180 | 633 | 4755 | 284 |
| 9 | 10/05/2014 | - | 109 | 150 | 7299 | - |
| 10 | 13/05/2014 | - | 207 | 480 | 2632 | 180 |
| 11 | 15/05/2014 | 1497 | 166 | 528 | - | 439 |
| 12 | 17/05/2014 | 2667 | - | - | 2137 | 3971 |

3.4.3 Sólidos suspendidos totales en función del caudal
La carga orgánica en términos de SST fue mucho más baja que las anteriores durante todo el período de muestreo, pues las concentraciones de sólidos suspendidos totales siempre fueron menores en comparación con la DBO5 y DQO, tal como lo muestra la Tabla 12.

Estos valores de carga orgánica que llegan hasta la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales tendrán influencia directa en cada uno de los procesos que se dan en el tratamiento de aguas residuales haciéndolos a su vez más óptimos, lo que permite obtener buenos porcentajes de remoción de carga contaminante en el agua residual.

Tabla 12. Carga orgánica en términos de SST

| N.º de muestreo | Fecha de Muestreo | ATLAPA | MH | TI | EB-2 | EB-3 |
|-----------------|-------------------|--------|-----|-----|------|------|
| CO (kg/día) | | | | | | |
| 1 | 23/04/2014 | 475 | 79 | 198 | - | - |
| 2 | 25/04/2014 | 82 | 10 | 89 | - | - |
| 3 | 28/04/2014 | - | 63 | 52 | 1662 | 13 |
| 4 | 29/04/2014 | 89 | 84 | 152 | 319 | 11 |
| 5 | 02/05/2014 | 445 | 92 | 203 | 168 | 24 |
| 6 | 05/05/2014 | 341 | 18 | 9 | 895 | - |
| 7 | 07/05/2014 | 148 | 102 | 52 | 623 | 21 |
| 8 | 09/05/2014 | 771 | 26 | 57 | 708 | 36 |
| 9 | 10/05/2014 | - | 5 | 9 | 2770 | - |
| 10 | 13/05/2014 | - | 67 | 68 | 448 | 38 |
| 11 | 15/05/2014 | 216 | 6 | 95 | - | 25 |
| 12 | 17/05/2014 | 428 | - | - | 205 | 109 |

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La carga orgánica en términos de SST fue mucho más baja que las anteriores durante todo el período de muestreo, pues las concentraciones de sólidos suspendidos totales siempre fueron menores en comparación con la DBO5 y DQO, tal como lo muestra la Tabla 12.

- Los resultados obtenidos durante el período de muestreo indican que cambios en las precipitaciones causaron alteraciones tanto en las concentraciones de los distintos parámetros fisicoquímicos y biológicos así como variaciones en los caudales del agua residual.
- A pesar de que los límites máximos permisibles que establece la norma DGNTI-COPANIT 39-2000 para parámetros fisicoquímicos como biológicos algunos fueron sobrepasados, la afectación al proceso de tratamiento no es considerable.
- Los valores obtenidos para pH y temperatura estuvieron dentro del rango establecido por las normas para agua residual cruda. Estos parámetros juegan un papel fundamental en la interferencia de los procesos biológicos.
- Tanto la DBO5 como la DQO tuvieron concentraciones muy elevadas durante todo el período de muestreo. Sin embargo, la relación establecida para estos parámetros estuvo dentro del rango establecido por la norma, por lo que

se asegura una buena degradación de la materia orgánica presente.

- A pesar de que no existe un sistema de alcantarillado combinado (pluvial y sanitario) en el Proyecto de Saneamiento de la Bahía y Ciudad de Panamá, para fuertes precipitaciones de agua de lluvia la influencia de ésta es inevitable. El mayor problema es porque se conectan los sistemas de recolección viejos a los nuevos, y estos están colapsados.

4.2 Recomendaciones

- Es necesario el monitoreo constante de parámetros como pH, temperatura, conductividad, entre otros; en todos los puntos de control del Proyecto de Saneamiento de la Ciudad y Bahía de Panamá, pues sólo se realiza para Interceptor Costero. Esto permite la detección temprana de vertidos incontrolados en las redes de saneamiento.

- También es fundamental controlar los caudales en los colectores, pues la evaluación de los cambios producidos es importante para el conocimiento sobre el estado de la red de saneamiento.

- Es importante conocer los caudales bombeados por las distintas estaciones de bombeo, pues se puede realizar un mejor mantenimiento con la detección temprana de daños al sistema, lo que puede disminuir costos energéticos y permite un mejor control de las bombas.

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a Dios, quien motivó cada día mi espíritu de fe y esperanza para no desmayar en el camino.

A la Doctora Casilda Saavedra de Madrid, pues su esfuerzo y comprensión motivó el desarrollo y finalización de esta investigación.

Y por último, el más sincero agradecimiento a Degrémont S.A. Su apoyo económico, como empresa comprometida con el bienestar social, fue indispensable para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] N. K. Lac., Panamá, 2014.
- [2] C. Gómez, «Manejo de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades (Tesis de Doctorado),» 2012. [En línea]. Available: www.datateca.unad.edu.co
- [3] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], «Toma de Muestra de Aguas Residuales - Bifenilos Policlorados,» 2013. [En línea]. Available: www.metropol.gov.co.
- [4] Ministerio de Comercio e Industrias [MICI], Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 39-2000 “Agua. Descarga de Efluentes Líquidos Directamente a Sistemas de Recolección de Aguas Residuales”, Panamá: Autor, 2000.
- [5] Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia [CORPOAMAZONIA], Protocolo para Toma de Muestras de Aguas Residuales, 2010.
- [6] C. Severiche, M. Castillo y R. Acevedo, Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos Básicos en Aguas, España: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso, 2013.
- [7] Suez Environment, Planificación del Muestreo y Análisis, 2013.
- [8] Endress y Hauser, «Manual de instrucciones abreviado Proline Prosonic Flow 93,» 2011. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com>
- [9] A. Guevara, «Métodos de Análisis para la Evaluación de la Calidad del Agua (Tesis de Maestría),» 1996. [En línea]. Available: www.bvsde.ops-oms.org
- [10] M. Espigares y J. Pérez, «Aspectos Sanitarios del Estudio de las Aguas,» 1985. [En línea]. Available: <http://cidta.usal.es>
- [11] J. Ríos, «Depuración de Aguas Residuales/Características de las Aguas Residuales Urbanas,» 2013. [En línea]. Available: www.triplenlace.com.
- [12] [En línea]. Available: www.personal.us.es