



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

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE MEMBRANAS DINÁMICAS PARA EL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR VÍA ANAEROBIA**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**JOSÉ ADRIÁN GONZÁLEZ ORTEGA**

**TUTOR PRINCIPAL:**  
**DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES**  
**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**COMITÉ TUTOR:**  
**DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA,**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**DR. GERMÁN CUEVAS RODRÍGUEZ**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ**  
**INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**DR. ALFONSO DURÁN MORENO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2014**



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA

Secretario: DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ

Vocal: DR. GERMÁN CUEVAS RODRÍGUEZ

1<sup>er.</sup> Suplente: DR. ALFONSO DURÁN MORENO

2<sup>do.</sup> Suplente: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM. MÉXICO D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

---

**FIRMA**



## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme estudiar en sus aulas.

Al Instituto de Ingeniería por abrirme las puertas y permitirme de ser parte de uno de sus proyectos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante mis estudios.

Al Dr. Adalberto Noyola por su respaldo, orientación y apoyo durante este proyecto así como al Dr. Juan Manuel Morgan por su colaboración y orientación.

A los miembros del jurado: Dra. Petia Mijaylova, Dr. Germán Cuevas; Dr. Germán Buitrón y Dr. Alfonso Durán por sus valiosas aportaciones y seguimiento.

A la M.C. Margarita Cisneros por su valioso apoyo en la parte administrativa; al Dr. Daniel de los Cobos por su guía y cercano seguimiento en la parte técnica; al Ing. Roberto Briones por sus consejos y apoyo en la parte operativa. También a Ponciano Trinidad, Sr. Maya y su equipo, a la M.C. Soledad Lucario por su entusiasta colaboración cada uno en su respectiva área. Así mismo, al personal de la Planta de Tratamiento Cerro del Agua, encabezado por el Ing. Juan Hilario García. Sin todos ustedes este trabajo no hubiera sido posible.

Al Dr. Omar Novelo del Instituto de Investigación en Materiales por las imágenes de Microscopia Electrónica de Barrido. Al Dr. Eduardo Vivaldo y su equipo de la Facultad de Química por las facilidades otorgadas en los ensayos de distribución de tamaño de partícula y a la Dra. Patricia Romero Mares del IIMAS, por su apoyo en el diseño experimental.

A mis compañeros de cubículo: Adriana, Tania, Elena, Daniela, Andrea, Elisa, Néstor y Miguel por los buenos momentos compartidos.

Al M.I. Juan Carlos Fernández y al Ing. Iván Michel Palomares, por su ejemplo para mi formación como ingeniero civil y a los doctores Simón González Martínez y Óscar González Barceló, por los valiosos conocimientos impartidos en sus asignaturas.

A todos mis amigos del posgrado, en especial a Isaac, Ana Lucía, Víctor, Jesús, Abraham, Miguel y Arturo con quienes compartí grandes momentos y aprendí de sus grandes cualidades.

A Lupe, la mejor roomie del mundo, gracias por compartir un espacio conmigo.

A Claudia Rodríguez, por su apoyo en la preparación del reactor UASB, así como a Ana Rendón con quien compartí grandes momentos en la primera etapa de este proyecto.

A Patricia de la Cruz, quien sin su apoyo incondicional este trabajo no hubiera sido terminado en tiempo y en forma. Gracias por tu esfuerzo, pero sobre todo por tu amistad.

A mi primo Iván por su apoyo durante esta maestría y a mi primo Óscar por su gran disposición y apoyo en la parte de manejo de datos.

A Diana Edith, gracias por tu compañía, por tu cariño y por el amor que me brindas día a día.

A mis hermanos Alex y Violeta, quienes han sido desde siempre un modelo a seguir.

A mis padres, por su incondicional apoyo, por creer siempre en mí, por su dedicación, esfuerzo y por los valores enseñados. Ustedes son un ejemplo de vida.

A la pequeña Victoria, quien ha traído amor, alegría y entusiasmo a mi vida.

## RESUMEN

La formación controlada de una capa taponante es la parte fundamental en un proceso de filtración dinámica a diferencia de un proceso de filtración convencional, en el cual esta capa es indeseada. Bajo condiciones específicas de operación, esta capa (llamada membrana dinámica) puede remover contaminantes y generar permeado a una productividad superior a un bioreactor de membrana convencional, convirtiéndola en una tecnología prometedora de bajo costo para el tratamiento de agua residual municipal. No obstante, existe una gran oportunidad en la identificación de tales condiciones.

El principal objetivo de este trabajo fue identificar las condiciones de operación que permitan obtener el mejor desempeño de un sistema de filtración dinámica formada a partir de agua residual municipal tratada por vía anaerobia en un reactor UASB. Así mismo se pretendió brindar información que coadyuvara a comprender su complejo proceso de formación y operación.

Se realizaron experimentos para determinar la influencia de dos variables: presión transmembrana (PTM) y tamaño de poro del material de soporte bajo tres distintos valores, empleando poliéster y polipropileno. Para ello, se evaluó la calidad y cantidad del permeado de nueve corridas de filtración dinámica, cada una bajo distintas condiciones de operación. Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente para encontrar diferencias significativas entre ellos.

Los resultados muestran que las condiciones que más favorecieron la formación de una membrana dinámica anaerobia fueron un soporte de polipropileno con tamaño de poro de 50  $\mu\text{m}$  y una PTM generada por una columna de agua de 1.92 m. Bajo estas condiciones se obtuvieron remociones de 90% de turbiedad; 77% de DQO y de 89% de SST, lográndose valores promedio en el permeado de 18 UTN; 218 mg/L; y 15 mg/L (respectivamente para cada parámetro) a un flux promedio de 82 L/m<sup>2</sup>h. Así mismo se identificaron los factores que tuvieron incidencia en la formación de la membrana dinámica así como una posible causa del comportamiento observado. Por ejemplo, se determinó que la interacción entre la PTM y tamaño de poro del soporte fue fundamental en el proceso de formación y operación. Así mismo se identifica que existe un efecto del tamaño medio de partícula del influente de la membrana y de la carga orgánica volumétrica del reactor.

## ABSTRACT

The controlled formation of a cake layer is the main characteristic of a dynamic filtration process in contrast to conventional filtration, in which this layer is undesired. Under specific conditions, the controlled cake layer –known as dynamic membrane– may be able to remove pollutants and generate permeate at higher productivity compared to conventional membrane bioreactors, emerging as a promissory low-cost technique for municipal wastewater treatment.

The main goal of this study was to identify the operational conditions that yield the best performance of a dynamic membrane formed inside an UASB reactor. Moreover, an additional objective was to generate information that contributes in the understanding of this developing technology, focusing on its possibilities, limits and its complex process of formation and operation.

In this study, experiments were done to assess the influence of transmembrane pressure (TMP) and pore size of support material under three different levels and using polyester and polypropylene as support materials. The quantity and quality of permeate of dynamic filtration under different operational conditions were monitored and statistically processed to find out significant differences among them.

The results allowed to identify the conditions that favored the formation of an anaerobic dynamic membrane: a polypropylene support with pore size of 50  $\mu\text{m}$  and a TMP generated by a water head of 1.92 m. Under these conditions, average removal efficiencies of 90% for turbidity; 77% for COD and 89% for SST were obtained. The corresponding average permeate values were 18 NTU; 218 mg/L; and 15 mg/L respectively, at an average flux of 82 L/m<sup>2</sup>h. In addition, it was determined that interaction between TMP and pore size had statistical significance in the process of membrane formation and operation. Likewise, it is suggested that particle size distribution and organic loading rate may have a direct effect on filtration performance.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT .....	7
CAPÍTULO 1.....	17
1 INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	19
1.1.1 JUSTIFICACIÓN .....	20
1.1.2 OBJETIVOS .....	20
CAPÍTULO 2.....	23
2 MARCO TEÓRICO .....	23
2.1 TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS .....	23
2.2 CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEMBRANAS.....	24
2.3 CONFIGURACIONES DE BIOREACTORES ANAEROBIOS DE MEMBRANAS (BRAM) .....	26
2.4 TAPONAMIENTO DE MEMBRANA.....	28
2.4.1 MECANISMOS Y MODELOS DE TAPONAMIENTO .....	30
2.5 MEMBRANA DINÁMICA (MD).....	32
2.5.1 ESTRUCTURA DE LAS MD .....	35
2.5.2 ACTIVIDAD BIOLÓGICA EN LA MD .....	35
2.5.3 FACTORES CON INCIDENCIA EN LA FORMACIÓN DE LA MD .....	36
2.5.4 DESEMPEÑO DE BIOREACTORES ANAEROBIOS DE MEMBRANA (BRAM) ACOPLADOS CON MD (BRAMD) .....	51
CAPÍTULO 3.....	53
3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	53
3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	53
3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL .....	54
3.2.1 COMPONENTE BIOLÓGICO .....	54
3.2.2 COMPONENTE DE FILTRACIÓN DINÁMICA.....	57
3.3 ARRANQUE Y OPERACIÓN.....	59
3.3.1 ARRANQUE .....	59
3.3.2 OPERACIÓN.....	61
3.4 TÉRMINO DE LA PRUEBA Y TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS 65	
CAPÍTULO 4.....	67
4 RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSIÓN.....	67
4.1 RESULTADOS .....	67

4.1.1	INSPECCIÓN MACRO Y MICROSCÓPICA .....	67
4.1.2	DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP) DEL PERMEADO ..	71
4.1.3	TENDENCIAS POR CICLO DE OPERACIÓN .....	71
4.1.4	TIEMPOS DE FORMACIÓN Y FILTRACIÓN EFECTIVA .....	74
4.1.5	EFFECTO EN LA REMOCIÓN DE DQO SOLUBLE .....	77
4.1.6	PRUEBAS DE SIGNIFICANCIA .....	78
4.1.7	OPERACIÓN DEL BRAMD (BIOREACTOR ANAEROBIO DE MEMBRANA DINÁMICA).....	81
4.2	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN .....	86
4.2.1	INSPECCIÓN MACRO Y MICROSCÓPICA .....	86
4.2.2	DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DEL PERMEADO .....	86
4.2.3	COMPORTAMIENTOS DE LOS PARÁMETROS POR CICLO DE OPERACIÓN .....	86
4.2.4	TIEMPOS DE FILTRACIÓN .....	88
4.2.5	ALTA PRESENCIA DE DQO SOLUBLE EN PERMEADOS .....	89
4.2.6	INFLUENCIA DE LOS FACTORES TAMAÑO DE PORO Y PTM Y SUS INTERACCIONES .....	90
4.2.7	INFLUENCIA DE LA COV .....	91
4.2.8	INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	93
4.2.9	COMPARACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS NUEVE CONDICIONES DE FILTRACIÓN .....	95
4.2.10	OPERACIÓN DEL BRAMD .....	98
4.2.11	DISCUSIÓN DE LOS VALORES DE CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD, DQO Y SST .....	100
4.2.12	EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SSLM CON LA PTM.....	101
CAPÍTULO 5.....		105
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	105
5.1	CONCLUSIONES.....	105
5.2	RECOMENDACIONES.....	107
6	BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXO A.....		115
ANEXO B.....		116

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Modelos de filtración para membranas dinámicas. Adaptado de (Yu & Dong, 2011) .....	31
Tabla 2.2 Métodos de limpieza de membranas convencionales asociados a reactores anaerobios.....	45
Tabla 3.1 Definición de factores y niveles de tratamiento a emplear en el diseño experimental .....	53
Tabla 3.2 Definición de tratamientos aplicados a cada uno de los dos materiales .....	53
Tabla 3.3 Características del influente .....	55
Tabla 3.4 Información del reactor UASB .....	56
Tabla 3.5 Condiciones de operación por corrida experimental.....	63
Tabla 3.6 Especificaciones de los ensayos realizados.....	64
Tabla 4.1 Tiempos de formación y filtración efectiva para poliéster .....	76
Tabla 4.2 Tiempos de formación y filtración efectiva para polipropileno.....	76
Tabla 4.3 Promedio de los parámetros analizados para las corridas con polipropileno....	82
Tabla 4.4 Desempeño del BRAMD, considerando el tratamiento B2 .....	85
Tabla 4.5 Clasificación de los tratamientos de acuerdo al IDFD y a tiempos de filtración efectiva para poliéster.....	89
Tabla 4.6 Pruebas de DBO realizadas al influente y permeado B2.....	90
Tabla 4.7 Comparación entre el agua residual del estudio y un agua residual típica .....	100
Tabla 4.8 Promedios de SSLM y flux por nivel de operación .....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Nube de palabras de la tesis.....	17
Figura 2.1 Tipos de membranas comparados con escalas de medidas de poro y partícula (Water Environment Federation, 2012) .....	23
Figura 2.2 Membrana de fibra hueca (Water Environment Federation, 2012) .....	24
Figura 2.3 Membrana de placa plana.....	25
Figura 2.4 Membrana tubular.....	26
Figura 2.5 Configuraciones de operación de un BRAM a) externa y b) interna o sumergida (Water Environment Federation, 2012) .....	26
Figura 2.6 Esquema de operación de un reactor UASB.....	28
Figura 2.7 Factores que afectan el taponamiento en BRM sumergidos (Le-Clech, et al., 2006). .....	29
Figura 2.8 Taponamiento por capa taponante (Water Environment Federation, 2012). ...	31
Figura 2.9 Taponamiento interno de poro (Water Environment Federation, 2012) .....	31
Figura 2.10 Proceso de formación de una MD .....	33
Figura 2.11 Comparación entre la filtración convencional y dinámica .....	34
Figura 2.12 Tipos de filtración.....	41
Figura 2.13 Tipos de entramado de textiles para material de soporte de la MD: a) malla; b) tejido; y c) no tejido.....	48
Figura 3.1 Esquema de la posición de los soportes para cada tratamiento.....	54
Figura 3.2 Esquema de funcionamiento del reactor UASB piloto empleado durante la experimentación (componente biológico).....	55
Figura 3.3 Niveles de operación del reactor y ubicación de los soportes con respecto a éstos.....	57
Figura 3.4 Distribución de tamaño de partícula en el efluente del reactor UASB (Cerón Vivas, 2013).....	57
Figura 3.5 Textil no tejido de polipropileno, a) 25 um; b) 50 um y c) 100 um. Los textiles con poliéster presentaron la misma estructura.....	58
Figura 3.6 Parte superior de la estructura de soporte sumergida en el reactor .....	59
Figura 3.7 Montaje experimental operando y durante la toma de muestras .....	60
Figura 3.8 Operación de la membrana dinámica.....	61
Figura 3.9 Esquema de operación por ciclos de una corrida tipo .....	62
Figura 3.10 Puntos de muestreo durante la experimentación .....	64

Figura 3.11 Fotografía a) antes y b) después de la limpieza de la MD .....	65
Figura 4.1 Membranas dinámicas formadas en una de las corridas experimentales.....	68
Figura 4.2 Soporte de polipropileno de 50 $\mu\text{m}$ a) antes de la filtración dinámica y b) una vez formada la MD con una columna hidrostática de 1.92 m .....	68
Figura 4.3 Película formada durante la operación del lado del permeado .....	69
Figura 4.4 Sólidos macroscópicos en una muestra de permeado .....	69
Figura 4.5 Imágenes de: a) soporte limpio de poliéster de 50 $\mu\text{m}$ ; b) MD; y c) película formada del lado del permeado. Las últimas imágenes corresponden a 50 $\mu\text{m}$ de tamaño de poro y a un PTM equivalente a un tirante de agua de 1.92 m .....	70
Figura 4.6 Imágenes de microscopio electrónico de barrido (MEB), a) soporte limpio de polipropileno de 50 $\mu\text{m}$ ; b) soporte con la MD formada; c) soporte en corte limpio y d) corte de la MD formada, las últimas dos imágenes corresponden a un tamaño de poro de 50 $\mu\text{m}$ .....	70
Figura 4.7 DTP del permeado B2 (tamaño de poro de 50 $\mu\text{m}$ y PTM equivalente a tirante de agua de 1.92 m) de una de las pruebas. Cada curva representa una repetición de la misma muestra .....	71
Figura 4.8 Tendencia del flux en las cuatro pruebas a lo largo de la operación .....	72
Figura 4.9 Tendencia de la turbiedad de permeado en las cuatro pruebas a lo largo de la operación.....	73
Figura 4.10 Tendencia de la DQO del permeado en las cuatro pruebas a lo largo de la operación.....	73
Figura 4.11 Tendencia de los SST en el permeado en las cuatro pruebas a lo largo de la operación.....	74
Figura 4.12 Tiempos de formación de MD y filtración efectiva de las pruebas a) 01PE; b) 03PE; c) 02PP; y d) 04PP .....	75
Figura 4.13 Proporción de DQO soluble .....	78
Figura 4.14 Valores-P obtenidos por prueba y por repetición.....	78
Figura 4.15 Resumen de pruebas de significancia estadística para poliéster .....	79
Figura 4.16 Resumen de pruebas de significancia estadística para polipropileno.....	79
Figura 4.17 Series de tiempo del tratamiento 04PPB2.....	83
Figura 4.18 Series de tiempo de la remoción de tratamiento 04PPB2 .....	84
Figura 4.19 Comparación de las muestras de a) influente del reactor; b) influente de la membrana B2; y c) permeado de la misma.....	85

Figura 4.20 Secuencia de tratamiento del proceso biológico: a) influente; b) nivel 3; c) nivel 2; y d) nivel 1 de operación dentro del reactor UASB .....	93
Figura 4.21 DTP de a) influente del reactor; b) nivel 3; c) nivel 2; y d) nivel 1 de operación .....	94
Figura 4.22 Comparación del funcionamiento de los nueve procesos de filtración dinámica en la prueba 02PP. Esta representación facilita el mostrar los resultados en términos de acercarse a identificar las mejores condiciones de operación con vista a hacer recomendaciones .....	96
Figura 4.23 Comparación entre a) el mejor y b) peor tratamiento en la prueba 04PP .....	98
Figura 4.24 Representación del comportamiento de la zona de expansión del reactor en dos distintas generaciones de biogás. La altura del lecho de lodos se determinó mediante un nucleador que se sumergía dentro del reactor y permitía extraer un núcleo del mismo para su análisis.....	101
Figura 4.25 Correlación entre concentración de SSLM y flux por nivel de operación .....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA: Análisis de varianza  
BRAM: Bioreactor anaerobio de membrana  
BRAMD: Bioreactor anaerobio de membrana dinámica  
BRM: Bioreactor de membrana (aerobio)  
COV: Carga orgánica volumétrica  
d(0.5): diámetro medio de partícula  
DBO: Demanda bioquímica de oxígeno  
DQO: Demanda química de oxígeno  
DTP: Distribución de tamaño de partícula  
EUA: Estados Unidos de América  
F/M: Relación sustrato/microorganismos  
IDFD: Índice de desempeño de la filtración dinámica  
MD: Membrana dinámica  
MEB: Microscopio electrónico de barrido  
MF: Microfiltración  
PMS: Productos microbianos solubles  
PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales  
PTM: Presión transmembrana  
SPE: Sustancias poliméricas extracelulares  
SSLM: Sólidos suspendidos del licor mezclado  
SST: Sólidos suspendidos totales  
SSV: Sólidos suspendidos volátiles  
TFE: Tiempo de filtración efectiva  
TRC: Tiempo de retención celular  
TRH: Tiempo de retención hidráulico  
UASB: Upflow anaerobic sludge bed  
UF: Ultrafiltración  
UTN: Unidades técnicas de nefelometría





energía para la realización de métodos de limpieza y a largo plazo reduce el periodo de vida de la membrana. A pesar de la investigación en el complejo tema del taponamiento en bioreactores de membrana aplicados para el tratamiento de agua, aún existen muchas preguntas sin resolver (Drews, 2010).

Si bien la capa taponante depositada en la superficie de la membrana reduce el flux, también contribuye a la remoción de DQO y sólidos; por lo tanto incide en la calidad final del permeado (Smith, *et al.*, 2012). Incluso, la formación de esta capa bajo ciertas condiciones de operación puede llegar a ser ventajosa. Una capa taponante formada *ex profeso*, bajo condiciones controladas y como elemento central del proceso de tratamiento es llamada membrana dinámica (MD), membrana secundaria o membrana formada en sitio. La MD puede incluso determinar las propiedades de rechazo del sistema (Ersahin, *et al.*, 2012).

En síntesis, el concepto de membrana dinámica convierte una de las desventajas más relevantes de los BRAM en una ventaja (Ersahin, *et al.*, 2014) al vencer el obstáculo del taponamiento, del costo inicial y del reemplazo de una membrana comercial, ya que una vez taponado el soporte, el material depositado puede ser removido fácilmente para la formación de otra MD (Zhang, *et al.*, 2011).

De acuerdo a Ersahin y colaboradores, mediante el control y ajuste de los materiales formadores de la capa taponante y las condiciones de formación de la MD, se pueden obtener desempeños similares a las membranas de MF y UF (Ersahin, *et al.*, 2012). Así mismo, Lin y colaboradores mencionaron en 2013 que la filtración dinámica es una técnica prometedora para mejorar la separación sólido-líquido en BRAM y para mantener el efluente a un nivel de calidad estable, incluso con una concentración no detectable de sólidos suspendidos (Lin, *et al.*, 2013). En cuestión de costos, se prevé que la inversión inicial y costos de operación de las MD sean sustancialmente menores a los de la filtración con membranas convencionales y competitivos con los sedimentadores y filtros de arena (Ersahin, *et al.*, 2012).

No obstante, en la formación y operación de una MD existen múltiples y complejas interacciones entre factores físicos y biológicos, incluso en sistemas a escala laboratorio donde las variables están controladas (Ozgun, *et al.*, 2013).

En ese sentido, en el presente estudio, se realizaron pruebas experimentales preliminares a escala laboratorio que brindaron perspectiva sobre la complejidad de la formación y operación de la MD. De esta manera se definieron distintos niveles de tratamiento para los factores tamaño de poro del soporte y PTM con el objeto de identificar las condiciones más propicias para la formación de la MD y se realizó un diseño experimental que fuera capaz de identificar diferencias significativas entre ellos. Además se evaluó el sistema para comprobar la reproducibilidad de los datos obtenidos y su robustez.

En el presente estudio se identifican tres características que contribuyen al avance del conocimiento en el tema:

- La investigación se enfocó en validar los datos obtenidos mediante repeticiones para determinar la reproducibilidad del comportamiento observado en una planta a escala piloto, bajo condiciones reales (cambiantes) de operación. Esto proporcionó una valiosa perspectiva del posible alcance de esta técnica, acerca de su operación a largo plazo y su potencial de escalamiento.
- Se ensayaron nueve distintas condiciones de filtración dinámica y se identificó la significancia estadística de dos variables dependientes (tamaño de poro del soporte y PTM) y su interacción mediante un análisis estadístico que considera la no normalidad de los datos así como la dependencia entre sí. Así mismo, se ensayaron dos materiales de soporte: poliéster y polipropileno.
- El contar con nueve tratamientos diferentes permitió generar información para elaborar un análisis completo de las posibles causas del comportamiento observado, siendo un estudio pionero en este tema en medio anaerobio.

## **1.1 JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **1.1.1 JUSTIFICACIÓN**

La investigación en bioreactores anaerobios de membrana dinámica (BRAMD) es aún muy limitada (Jeison, *et al.*, 2008), (Zhang, *et al.*, 2010), (Ersahin, *et al.*, 2012), (Ozgun, *et al.*, 2013) por lo que se tienen importantes incógnitas sobre las condiciones apropiadas que permiten la formación de la MD y su control efectivo. Por ello, es necesaria la identificación de las condiciones que fomenten el mejor desempeño de una membrana dinámica así como comprender el efecto de las variables que intervienen en su formación y operación, coadyuvando a la comprensión del funcionamiento y alcances de esta técnica.

### **1.1.2 OBJETIVOS**

#### **1.1.2.1 OBJETIVO GENERAL:**

Identificar las condiciones de operación que permitan obtener el mejor desempeño de un sistema de filtración de membrana dinámica formada a partir de agua residual municipal tratada por vía anaerobia.

#### **1.1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

1. Determinar condiciones de PTM, tamaño de poro y material del soporte que favorezcan la formación de una membrana dinámica dentro de un reactor UASB.
2. Obtener el menor tiempo de formación de la membrana dinámica y el mayor tiempo de filtración efectiva con respecto a las diferentes condiciones de operación probadas.

#### **1.1.2.3 ALCANCE:**

Encontrar condiciones adecuadas para la formación y operación de una membrana dinámica sumergida en un reactor UASB alimentado con agua real de tipo municipal en un reactor piloto.

#### **1.1.2.4 HIPÓTESIS:**

H<sub>0</sub>: El tamaño de poro del soporte, la PTM o la interacción entre ambas no influyen en el desempeño (en términos de flux y calidad de permeado) de una membrana dinámica anaerobia.

H<sub>a</sub>: El tamaño de poro del soporte, la PTM o la interacción entre ambas sí influyen en el desempeño (en términos de flux y calidad de permeado) de una membrana dinámica anaerobia.



## CAPÍTULO 2

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS

La operación unitaria de filtración se refiere a la separación de partículas sólidas inmiscibles de la fase líquida o gaseosa. La filtración por membranas extiende este concepto al incluir la separación incluso de solutos (Cheryan, 1998). El tipo de membrana a emplear se define con base en la remoción de partículas disueltas (solutos) y de partículas suspendidas o coloidales (Water Environment Federation, 2012) presentes en la solución a filtrar. En la Figura 2.1 se muestra el tipo de separación, el intervalo de tamaño de poro y el tamaño relativo de algunas partículas de interés en el campo del tratamiento de agua residual.

Microscopio	▶ ST	▶ Electrónico		▶ Óptico		▶ Simple vista		
Rango	iónico	molecular		macromolecular	micropartícula		macropartícula	
Micrometros	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	
Angstroms	10	100	1000	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	
Peso Molecular	100	200	1000	10000	20000	100,000	500,000	
Tamaño relativo de materiales comunes	Sal acuosa Ión metálico	Moléculas	Virus	Acidos húmicos	Arcillas	Coloides	Bacteria Algas Limos	Arena
Proceso de separación	Ósmosis Inversa	Nanofiltración	Ultrafiltración	Materia orgánica	Microfiltración	Filtración convencional		
	Electrodialísis	Coagulación						

Notas: 1 micra = 10<sup>-6</sup> m ; 1 Angstrom = 10<sup>-10</sup> m

*Figura 2.1 Tipos de membranas comparados con escalas de medidas de poro y partícula (Water Environment Federation, 2012)*

## 2.2 CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEMBRANAS

Existen tres configuraciones de módulos de membrana:

- a) Membranas de fibra hueca: son pequeños tubos flexibles que tienen un diámetro externo de entre 0.5 a 3 mm. Se forman al empaquetar a varios elementos filtrantes en módulos o cassettes que pueden ser rectangulares o circulares. La biomasa se encuentra al exterior de la membrana y se ejerce un vacío desde su interior. Representan menor consumo de energía y menores costos de inversión en comparación con las otras configuraciones. Sin embargo presentan un flux operacional reducido. En la Figura 2.2 se observa un esquema de esta configuración:

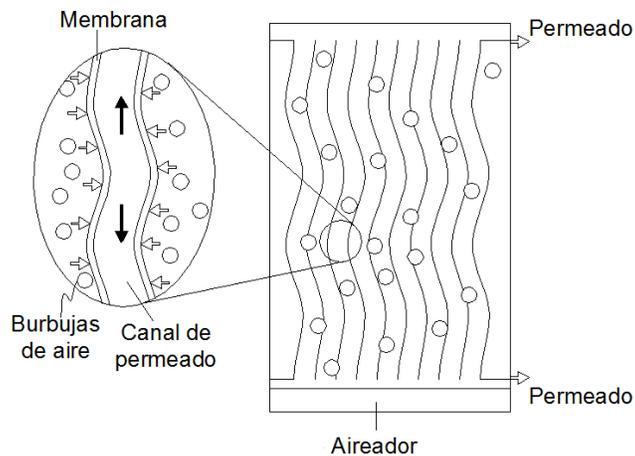
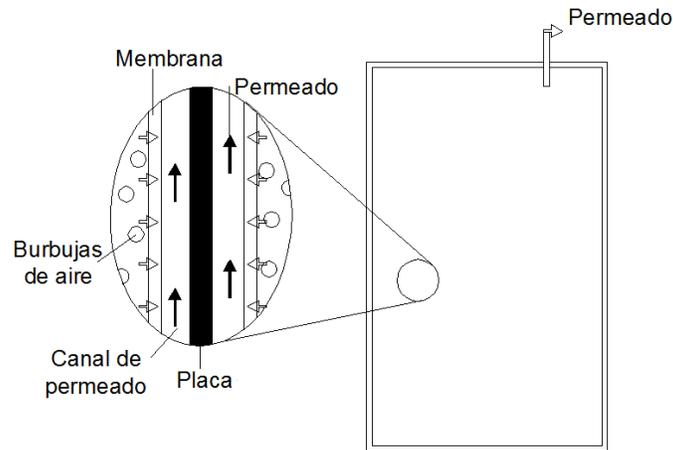


Figura 2.2 Membrana de fibra hueca (Water Environment Federation, 2012)

- b) Placas planas: Se componen de dos hojas de membrana conectadas por un soporte interno que funciona como canal de extracción del permeado. La estructura completa es llamada panel y tiene un espesor entre 5 y 13 mm (Figura 2.3). Cada panel tiene una separación entre 6 y 10 mm. A comparación de las membranas de fibra hueca, permite mayores valores de flux en la operación y su capacidad está limitada por la PTM. Esta configuración no puede ser limpiada en forma efectiva por retrolavado, por lo

tanto su limpieza es química, incrementando los costos de operación (Water Environment Federation, 2012).



*Figura 2.3 Membrana de placa plana*

- c) Tubular: Son tubos de diámetro interno de 5 a 13 mm donde la membrana se encuentra adherida en su interior, sobre un soporte tubular de celulosa. Normalmente un módulo de membranas se compone de varios tubos filtrantes que se unen en ambos extremos, en uno de ellos se introduce el agua a filtrar y se retira el rechazo por el otro extremo. Son elementos externos al reactor, no sumergidos, colocados en una línea de bombeo cuyo rechazo vuelve normalmente al reactor biológico. El permeado pasa a través de las paredes de los tubos y es captado por una cubierta tubular externa. (Figura 2.4). Esta configuración puede operarse a mayor flux y mayor concentración de sólidos suspendidos en el licor mezcla, pero requiere mayor caudal y un consumo de energía mayor que los módulos de membranas sumergidas, ya sean fibras huecas o planas. El método de limpieza no requiere el drenado del tanque de procesos biológicos y presentan buena eficiencia debido a la alta velocidad de corte obtenida por la filtración de flujo cruzado que controla el espesor de la capa taponante (Water Environment Federation, 2012).

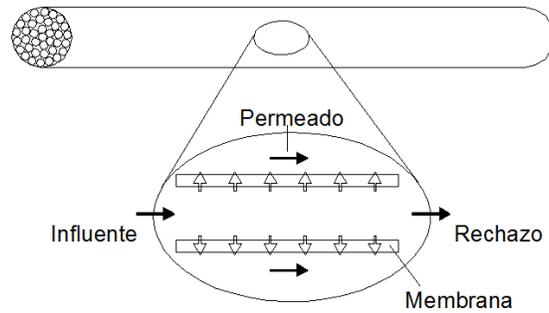


Figura 2.4 Membrana tubular

### 2.3 CONFIGURACIONES DE BIOREACTORES ANAEROBIOS DE MEMBRANAS (BRAM)

En la operación de un BRAM se emplean dos configuraciones para ubicar los módulos de membranas: interna o sumergida y externa o de flujo lateral (Figura 2.5).

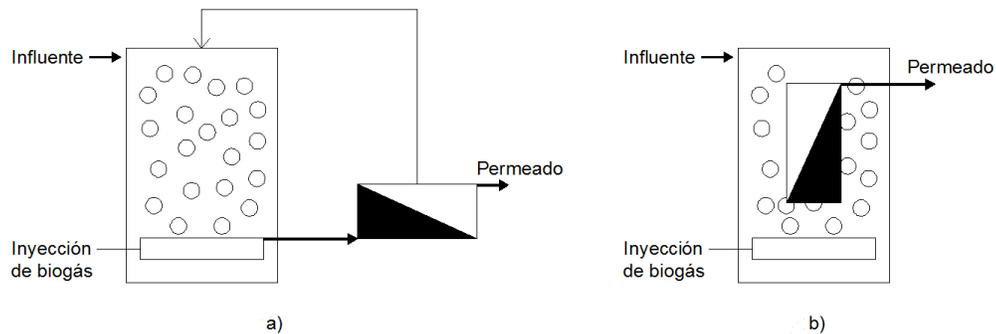


Figura 2.5 Configuraciones de operación de un BRAM a) externa y b) interna o sumergida (Water Environment Federation, 2012)

- a) En un BRAM con membrana externa, el módulo de operación se encuentra separado del tanque biológico y la biomasa se bombea hacia los módulos. Pueden operar bajo succión (flujo de afuera hacia adentro) o bajo presión (flujo de adentro hacia afuera). Esta configuración es empleada para membranas tubulares y requiere la aplicación de flujo cruzado, el cual mantiene los sólidos en suspensión y permite remover o al menos reducir el espesor de la capa taponante en la superficie de la membrana. Aunque esta

configuración es simple y ofrece mayor control hidrodinámico del taponamiento, la demanda de energía es alta.

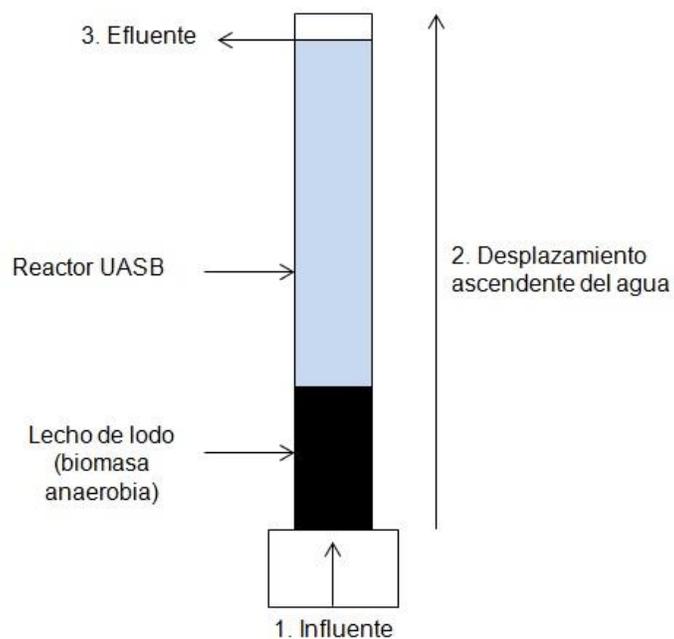
- b) En un BRAM con membrana sumergida la biomasa se ubica al lado de las fibras, como resultado la membrana es operada bajo succión y el permeado fluye de afuera hacia dentro de la membrana. Esta configuración se emplea típicamente para las membranas tipo fibra hueca y tipo hoja plana. En una revisión de la literatura en 2012, Stuckey indicó que aparentemente los sistemas de membranas sumergidos están dominando en la práctica debido a costos de inversión y operación más bajos que las membranas tubulares externas. En esta configuración el control del taponamiento depende de las burbujas generadas por la inyección de biogás dentro del tanque. Así mismo la biomasa está sujeta a una fuerza de corte menos severa y por lo tanto experimenta menor nivel de estrés. Sin embargo esta configuración tiene mayor propensión al taponamiento y presenta menor flux que la configuración externa, por lo que es necesaria la instalación de mayor área de filtración (Stuckey, 2012).

Los valores de flux en los BRAM con membrana externa son influenciados principalmente por valores de las PTM y la velocidad de flujo cruzado mientras que en reactores sumergidos son influenciados por la PTM, la intensidad de la inyección de biogás y la duración de la relajación (Bérubé, *et al.*, 2006).

Comparadas con las bacterias aerobias, las bacterias anaerobias requieren un tiempo de retención más largo debido a sus menores tasas de crecimiento. Por lo tanto, para un sistema de tratamiento anaerobio la inmovilización o retención de la biomasa es esencial y por lo tanto el TRC debe ser mayor al TRH ( $TRC > TRH$ ). Las tecnologías con base a gránulos y biopelícula representan la forma tradicional de lograr la retención de biomasa anaerobia necesaria para permitir la operación de bioreactores a altas concentraciones de biomasa y en consecuencia a altas cargas orgánicas (Jeison, *et al.*, 2008).

En un reactor UASB, la biomasa se inmoviliza por un proceso de agregación espontánea de las bacterias para formar gránulos densos y compactos con alta velocidad de sedimentación, que se depositan en el fondo del reactor, formando un lodo biológico (llamado biomasa o lodo). El proceso de granulación se ve favorecido por la combinación de una alta velocidad de flujo ascendente y un corto tiempo de retención hidráulico (Quarmby & Forster, 1995).

El influente se distribuye desde el fondo del reactor y viaja con una velocidad ascendente a través del lecho de lodo hasta la salida del efluente, en la parte superior del reactor. El esquema de operación de un reactor UASB escala laboratorio se muestra en la Figura 2.6.

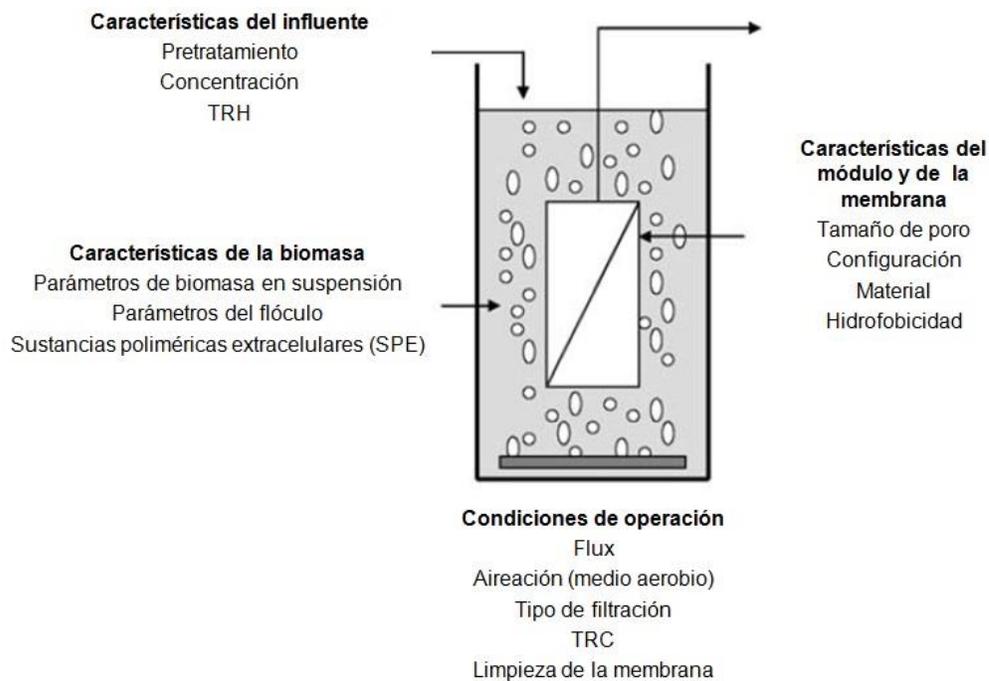


*Figura 2.6 Esquema de operación de un reactor UASB*

## 2.4 TAPONAMIENTO DE MEMBRANA

El taponamiento resulta de la interacción entre el material de la membrana y los componentes del lodo como sustrato, células, residuos celulares y metabolitos microbianos como las sustancias poliméricas extracelulares (SPE) y productos microbianos solubles (PMS) (Chang, *et al.*, 2002). La capa taponante puede ser descrita como un medio poroso con un sistema complejo de vacíos y partículas interconectados entre sí (Meng, *et al.*, 2009).

De acuerdo a Le-Clech (2006) el taponamiento en un bioreactor de membranas convencional (con membranas de MF y UF) se ve influenciado principalmente por cuatro factores: características del influente; características del módulo y de la membrana; condiciones de operación; y características de la biomasa. En la Figura 2.7 se observan estos factores:



*Figura 2.7 Factores que afectan el taponamiento en BRM sumergidos (Le-Clech, et al., 2006).*

Sin embargo, es de esperarse que el proceso de deposición de sólidos en materiales de poro grueso (membranas dinámicas) sea completamente distinto al de las membranas de MF y UF, tomando en consideración las distintas

características de estos materiales y su entorno hidrodinámico (por ejemplo un alto flux inicial en las dinámicas). Por ello, las conclusiones de los bioreactores de membrana convencionales (sean aerobios o anaerobios) no son directamente aplicables a los bioreactores anaerobios de membrana dinámica (BRAMD) (Liang, *et al.*, 2013).

No obstante, la formación de la capa taponante determina las propiedades de filtración en aplicaciones aerobias y anaerobias (Skouteris, *et al.*, 2012) y esto también aplica para sistemas de filtración dinámica (Ersahin, *et al.*, 2012) (Zhang, *et al.*, 2011) (Chu & Li, 2006) donde la membrana puede ser reemplazada por un soporte económico y de alta permeabilidad sobre el cual se desarrolla una capa taponante y filtrante (Ozdemir, *et al.*, 2012).

Dado que a la fecha (2014) la formación de la capa taponante en materiales de poro grueso y en medio anaerobio aún se encuentra en una etapa temprana de estudio, el punto de partida de este trabajo fue la investigación realizada en el fenómeno del taponamiento en BRM convencionales.

#### **2.4.1 MECANISMOS Y MODELOS DE TAPONAMIENTO**

Existen dos mecanismos de taponamiento ampliamente identificados: 1) el taponamiento por capa taponante (cake fouling) se refiere a la acumulación física de material coloidal y suspendido sobre la superficie de la membrana (Figura 2.8). Este material es más grande que los poros de la membrana y forma una capa taponante en la superficie. Usualmente este tipo de taponamiento es reversible (Jeison, *et al.*, 2009) y el declive en el desempeño de la membrana durante los primeros segundos o minutos de la operación se debe principalmente a la formación de esta estructura (Böhm *et al.*, 2012); y 2) el taponamiento de poro, que ocurre cuando los coloides, solutos y células se precipitan dentro de los poros de las membranas y es típicamente irreversible. Ver Figura 2.9.

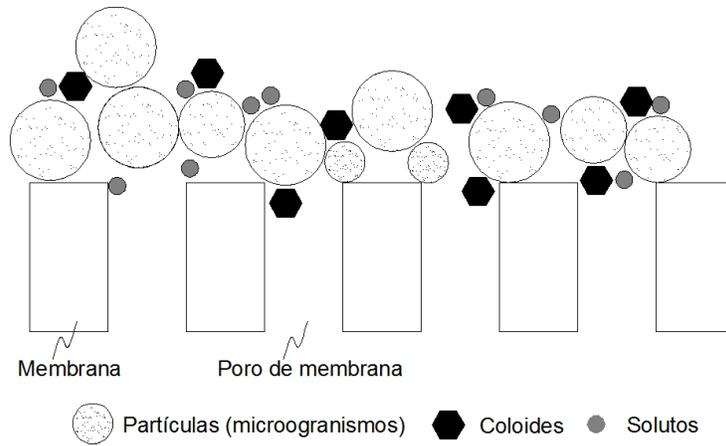


Figura 2.8 Taponamiento por capa taponante (Water Environment Federation, 2012).

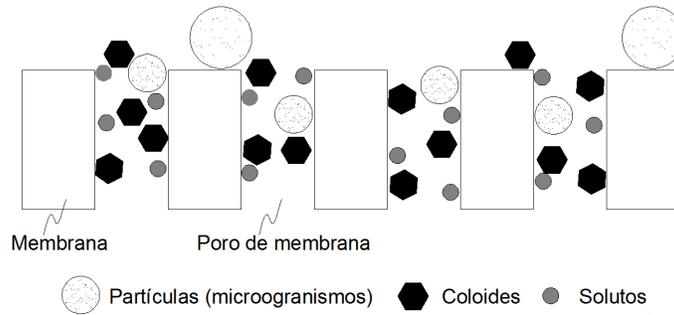


Figura 2.9 Taponamiento interno de poro (Water Environment Federation, 2012)

Aunque establecer un modelo general para describir el taponamiento es difícil dada la inherente heterogeneidad del sistema (Chang, *et al.*, 2002) en la Tabla 2.1 se muestran los modelos de filtración desarrollados para una membrana dinámica (MD):

Tabla 2.1 Modelos de filtración para membranas dinámicas. Adaptado de (Yu & Dong, 2011)

Tipo de taponamiento	Condiciones de formación	Descripción	Observaciones
Capa o torta taponante	$a > r$	Acumulación de las partículas en la superficie del soporte que incrementa la resistencia hidráulica a la filtración	a: tamaño de partícula r: tamaño de poro de la membrana
Bloqueo completo	$a \approx r$	Obturación de poro que evita el paso del fluido como resultado de una reducción de área	
Bloqueo intermedio	$a < r$	Obturación de poro por una fracción de partículas y la deposición del resto sobre éstas	
Bloqueo estándar	$a \ll r$	Las partículas se acumulan en el interior de la membrana reduciendo su permeabilidad	

En la investigación realizada por Cerón Vivas en 2013 con una membrana tubular de UF sumergida en un reactor UASB, se encontró una predominancia del taponamiento superficial a través de los mecanismos de formación de capa taponante, seguido del bloqueo completo e intermedio. Sin embargo, los modelos de mecanismos de taponamiento no predijeron adecuadamente el mecanismo de taponamiento en la membrana (Cerón Vivas, 2013).

En el caso del mecanismo de formación de la capa taponante en filtración dinámica, la deposición de lodo durante la formación de la MD parece estar dominada por la fuerza de arrastre de la alimentación hacia el soporte, así como por su interacción hidrofóbica, mientras que la velocidad de taponamiento subsecuente a la formación se controla por el contenido de SPE (Liang, *et al.*, 2013). Este tema será tratado a detalle más adelante en este capítulo.

## 2.5 MEMBRANA DINÁMICA (MD)

Una MD se forma sobre un material de soporte (textil o malla) cuando la solución a filtrar contiene partículas sólidas suspendidas (flóculos) de mayor tamaño al del poro del soporte. Una vez formada la MD, las partículas de menor tamaño al poro son retenidas en la capa de filtración de biomasa y así se logra un filtrado de calidad

adecuada (Ersahin, *et al.*, 2012) dando lugar a una alta permeabilidad. Incluso, la membrana dinámica es conocida como membrana secundaria, dado que en realidad es la unidad funcional de filtración. En la Figura 2.10 se observa esquemáticamente el proceso de formación de la MD:

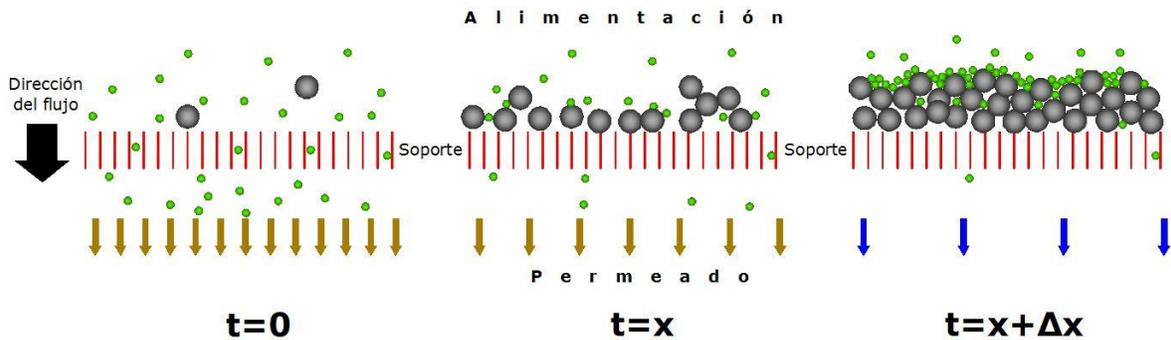


Figura 2.10 Proceso de formación de una MD

En la filtración convencional la capa taponante es indeseada, debido a que perjudica la operación del sistema y es necesario retirarla para que la membrana de UF o MF comercial efectúe el proceso de separación. En la filtración dinámica, se busca formar una capa taponante bajo condiciones controladas de manera que las partículas de mayor tamaño al poro del soporte se depositen sobre este y formen una estructura secundaria de filtración que se encargue de la separación de partículas de menor tamaño al del soporte. En el caso de una MD autoformada, en términos básicos es posible hablar de una *autofiltración*. En la Figura 2.11 se presenta una comparación entre los dos tipos de filtración.

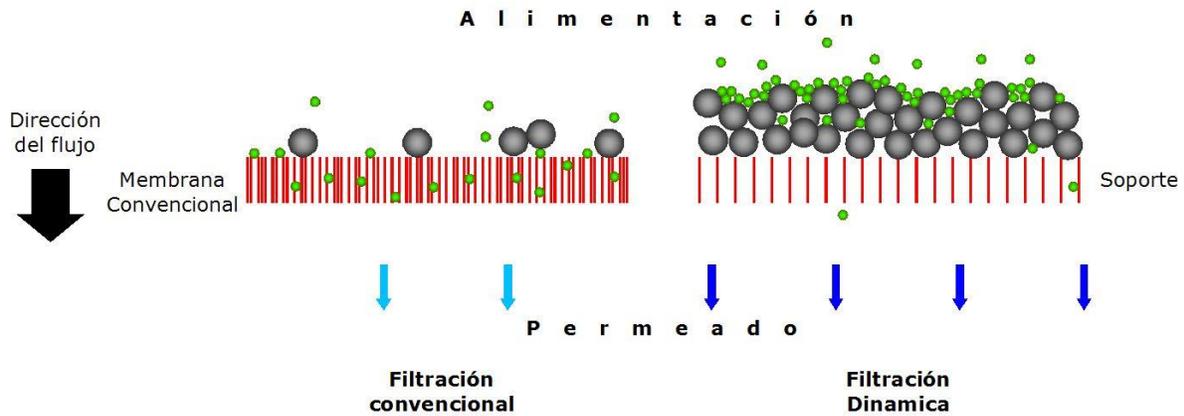


Figura 2.11 Comparación entre la filtración convencional y dinámica

La MD se forma cuando la solución filtrada contiene partículas suspendidas como células microbianas, flóculos biológicos o material inerte y el resultado obtenido es una superficie que actúa como capa de filtración. La formación de esta estructura porosa permite mantener una alta permeabilidad y en consecuencia un flux de operación más alto a comparación de las membranas convencionales (Poostchi, *et al.*, 2012).

Si bien el concepto de membrana dinámica no es nuevo y fue reportado por primera vez en 1965 en aplicaciones de desalinización (Marcinko, *et al.*, 1966), la filtración dinámica es ampliamente usada en la industria, pero las aplicaciones para tratamiento biológico de agua residual municipal aún están en sus inicios (Ersahin, *et al.*, 2012) siendo la primera aplicación en tratamiento de agua residual municipal a mediados de la década de 1990. La aplicación de este concepto en el campo de tratamiento biológico ha tomado fuerza debido al problema operacional del taponamiento en las membranas comerciales de los bioreactores de membrana.

La filtración dinámica es vista como prometedora especialmente para sistemas pequeños de tratamiento donde se requiere una mínima inversión y costos de operación bajos, así como simplicidad operacional (Ersahin, *et al.*, 2012). Así mismo, las MD son una alternativa para mejorar el desempeño de los filtros textiles,

los cuales pueden ser usados para la filtración en lugar de una membrana MF o UF. Incluso, la MD puede ser considerada como un filtro textil modificado (Meng, *et al.*, 2009).

La MD se clasifica en autoformada y preformada, siendo la segunda construida mediante la deposición de una sustancia externa y la primera por los componentes del mismo medio que filtra. La presente investigación se enfoca en el uso de MD autoformadas dentro de un reactor UASB.

### **2.5.1 ESTRUCTURA DE LAS MD**

De acuerdo a Fan y Huang, la MD consiste en dos capas: la capa taponante (cake o torta) y la capa gel. La capa taponante está compuesta de flóculos de lodo y puede ser removida fácilmente. En cambio la capa gel está compuesta de SPE que se adhieren fuertemente a la superficie de soporte, por lo que su remoción es más difícil (Fan & Huang, 2002). La formación de la capa gel ha sido mencionada también por Stuckey (Stuckey, 2012) y por Zhang y colaboradores, quienes observaron la formación de estas dos capas en su trabajo (Zhang, *et al.*, 2011).

La capa gel es importante en el rechazo de partículas finas dado su parecido con las membranas convencionales y puede lograr remoción de DQO y solutos de bajo peso molecular (Stuckey, 2012). Por otro lado, la capa taponante juega dos funciones importantes: mejorar la calidad del efluente mediante el rechazo de flóculos grandes y evitar la interacción directa de partículas grandes con la capa gel (Ersahin, *et al.*, 2012).

### **2.5.2 ACTIVIDAD BIOLÓGICA EN LA MD**

En un BRAM la biomasa suspendida representa la mayor contribución en la remoción de material orgánico y una actividad metanogénica más alta. En contraste, la biomasa acoplada a la membrana no juega un rol significativo en estos aspectos (Ho & Sung, 2010). Sin embargo, no se puede ignorar los procesos biológicos que

ocurren en esta capa en función de las condiciones del entorno. Si bien se presenta una transformación biológica de contaminantes en la MD, existe una baja transferencia de masa sustrato-microrganismo al ser una estructura compacta (Ersahin, *et al.*, 2012) a comparación de la biomasa suspendida.

Así mismo, de acuerdo a Herrera-Robledo, el material taponante recolectado en su trabajo de investigación con una membrana comercial se compuso en base seca de 85% de material orgánico, del cual solo el 5% se relacionó con biomasa bacteriana (Herrera-Robledo, 2007).

### **2.5.3 FACTORES CON INCIDENCIA EN LA FORMACIÓN DE LA MD**

La formación y la operación de la MD es afectada por factores como el tamaño de poro, características de la solución y el material del módulo (Yu & Dong, 2011). A continuación se presenta una revisión de los factores relevantes en la formación de la capa taponante en un proceso de BRM convencional de acuerdo a la clasificación de Le-Clech (2006). Se reitera que se empleó como punto de partida la información disponible para este tipo de tecnología, dado el relativo escaso estudio en filtración dinámica anaerobia.

#### **2.5.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA**

Debido a que la formación de una MD autoformada es esencialmente resultado de la deposición inicial de sólidos en el material de poro grueso, se espera que las propiedades de filtración de la MD se vean afectadas significativamente por las características de la biomasa presente en el reactor. En este apartado se considera el efecto de la distribución de tamaño de partícula, las sustancias poliméricas extracelulares y la concentración de sólidos en el licor mezcla.

##### **2.5.3.1.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP)**

Este aspecto se refiere a la caracterización de la talla de los flóculos (partículas) contenidos en la solución a filtrar. Un flóculo es una entidad microbiana formada por diferentes especies de biomasa. El tamaño de los flóculos es un factor dominante que afecta la velocidad de formación de la capa taponante (Lin, *et al.*, 2010), la resistencia a la filtración (Bae & Tak, 2005) (Lin, *et al.*, 2011) y la permeabilidad (Le-Clech, *et al.*, 2006).

Si bien los flóculos pequeños pueden generar condiciones apropiadas para la transferencia de masa (Jeison & van Lier, 2007) también pueden incrementar la resistencia a la filtración debido a la acumulación de partículas pequeñas que conllevan a un taponamiento más severo (Ozgun, *et al.*, 2013) (Liu, *et al.*, 2012). De acuerdo a Jeison y colaboradores, aparentemente la combinación de un tamaño pequeño de partícula y una viscosidad mayor, jugaron un rol predominante en el desempeño de la filtración dinámica observada en su experimento (Jeison, *et al.*, 2009), con un flux de 6.5 L/m<sup>2</sup>h.

De acuerdo con Le-Clech, después de un cierto tamaño de partícula, el efecto de la fuerza electrostática se vuelve despreciable y se inicia un proceso de migración debido a las fuerzas hidrodinámicas y la permeabilidad se incrementa proporcionalmente con el tamaño de partícula (Le-Clech, *et al.*, 2006). De la misma manera, Liang realizó experimentos de corta duración para elucidar el efecto de las características del lodo en una membrana dinámica aerobia y encontró que la formación llevó menor tiempo en el caso de un lodo con una proporción alta de partículas grandes.

Además, en ese trabajo se encontró que el diámetro medio de los componentes de la MD fue entre 24.3% y 26.9% mayor al del lodo en suspensión y que la capa taponante generó una superficie para la deposición de partículas más pequeñas. Quizá la conclusión más relevante de ese estudio fue que la suspensión de lodo con un tamaño medio mayor al del poro del soporte no solo llevó a una formación rápida de la MD sino también a una menor resistencia a la filtración (Liang, *et al.*, 2013). Si

bien estas conclusiones fueron generadas para un medio aerobio, a la fecha no hay investigaciones similares bajo condiciones anaerobias.

Un reactor UASB permite la retención de las partículas más grandes en el fondo del mismo, lo que conlleva a que la membrana colocada en la parte alta se encuentre expuesta a un rango limitado de granulometría. Por lo tanto es importante considerar el tamaño medio de partícula al momento de elegir el tamaño de poro del soporte.

#### 2.5.3.1.2 SUSTANCIAS POLIMERICAS EXTRACELULARES (SPE) Y PRODUCTOS MICROBIANOS SOLUBLES (PMS)

Las SPE son en esencia secreciones mucosas de las células microbianas. Los PMS son productos microbianos liberados como resultado de la lisis celular, la hidrólisis de las SPE y en respuesta de los microorganismos por su interacción con las condiciones cambiantes del entorno (Skouteris, *et al.*, 2012). Las SPE son los materiales de construcción de agregados microbianos como biopelículas y flóculos. Los microorganismos de un flóculo están inmersos en una matriz de SPE y proveen una barrera importante al flujo de permeado.

En la investigación en BRM convencionales se ha documentado ampliamente el relevante efecto de las SPE y los PMS en el taponamiento (Lin, *et al.*, 2013) (Ozgun, *et al.*, 2013) (Wu & Zhou, 2010) (Yin, *et al.*, 2012) (Chang, *et al.*, 2002) (Meng, *et al.*, 2009). Así mismo las SPE están estrechamente relacionadas con la resistencia de la capa taponante (Jang, *et al.*, 2006).

Las SPE y los PMS pueden adherirse a los flóculos o estar libremente suspendidas y juegan un doble papel: pequeñas cantidades de SPE en el lodo suspendido resultan en un incremento de partículas pequeñas, afectando la DTP y causando mayor resistencia a la filtración (Ersahin, *et al.*, 2014); por otro lado una cantidad excesiva rodea a las partículas en el licor mezcla e incrementa el potencial de adhesión a la MD lo que también resulta en un incremento en la resistencia de la filtración (Liang, *et al.*, 2013).

En síntesis, es necesario contar con un valor óptimo suficientemente alto que permita la formación de un flóculo de tamaño adecuado y a la vez, lo suficientemente bajo para que los mismos no se conviertan en una sustancia gelatinosa que reduzca la permeabilidad de la MD.

#### 2.5.3.1.3 CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN EL LICOR MEZCLA (SSLM)

La concentración de sólidos suspendidos en el licor mezcla no solo afecta la formación de la membrana dinámica si no también el nivel de tratamiento del sistema (Yu & Dong, 2011).

De la misma manera que las SPE, la concentración de sólidos debe ser lo suficientemente alta para permitir la formación de la MD y al mismo tiempo baja para evitar una deposición excesiva sobre su superficie. Si bien un reactor UASB tiene una concentración de 20-40 kg SST/m<sup>3</sup>, este valor se encuentra en la parte inferior del mismo y la mayor parte de la biomasa no se encuentra en contacto directo con el soporte, lo que permite un tratamiento biológico en la parte baja y un pulimento por filtración dinámica en la parte superior del reactor (Ozgun, *et al.*, 2013).

En sistemas aerobios, Chu y Li postularon que una alta concentración de sólidos puede contribuir positivamente a la formación de la MD a expensas de contar con mayor concentración de sólidos en el permeado y menores valores de flux (Chu & Li, 2006). Se ha obtenido una buena calidad de efluente en concentraciones de 5,000 y 3,500 mg/L, pero con un menor flux (42 L/m<sup>2</sup>h) en la alta concentración a diferencia del obtenido a la concentración de SSLM baja (125 L/m<sup>2</sup>h) (Alavi Moghaddam, *et al.*, 2002). En uno de los primeros experimentos publicados con MD anaerobias, Pillay y colaboradores determinaron que un incremento en la concentración de SST resulta en un significativo descenso del flux (Pillay, *et al.*, 1994).

En contra de la tendencia general Lin y colaboradores concluyeron que la concentración de SSLM no tiene una correlación con la velocidad de formación de la capa taponante en el intervalo de 3.7 a 5.7 g/L (Lin, *et al.*, 2010).

### **2.5.3.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN**

#### 2.5.3.2.1 TIPOS DE FILTRACIÓN

##### 2.5.3.2.1.1 PUNTO MUERTO (DEAD-END)

En la filtración tipo punto muerto (o sin salida), el flujo de la solución a filtrar es perpendicular a la superficie de filtración y todo el influente es forzado a traspasar la membrana. Es una técnica útil cuando la concentración de partículas en la solución es baja, cuando su arreglo no produce una pérdida significativa de presión o cuando se desea concentrar compuestos. No obstante, se requiere un proceso subsecuente para retirar la materia acumulada en la superficie de la membrana (Koch Membrane Systems Inc., 2012).

##### 2.5.3.2.1.2 FLUJO CRUZADO

La solución a filtrar se introduce en el módulo de filtración mediante un flujo turbulento constante paralelo a la superficie de la membrana. De esta manera se previene la acumulación de material en la superficie de la membrana y se proporciona una velocidad estable de filtración.

Solo una fracción de la solución es capaz de atravesar la membrana. Esta técnica es adecuada para influentes con una alta concentración de material suspendido como partículas o macromoléculas como células, proteínas o precipitados los cuales se compactarían rápidamente en la superficie de la membrana en la operación a punto muerto, llevando su operación a un nivel no práctico (Munir, 2006).

### 2.5.3.2.1.3 FILTRACIÓN SUMERGIDA

Es una clase de filtración híbrida en la cual la membrana se encuentra sumergida en el líquido a filtrar. La filtración se realiza desde afuera hacia dentro y la fuerza motriz es una diferencia de presión entre el lado de la alimentación y del permeado. Para evitar la deposición excesiva de material en la superficie de filtración, se generan fuerzas cortantes paralelas mediante un flujo de gas o agua a lo largo de la membrana (Munir, 2006). A diferencia de la filtración por punto muerto, no todo el influente es forzado a atravesar la membrana. En la Figura 2.12 se muestran los tres tipos de filtración.

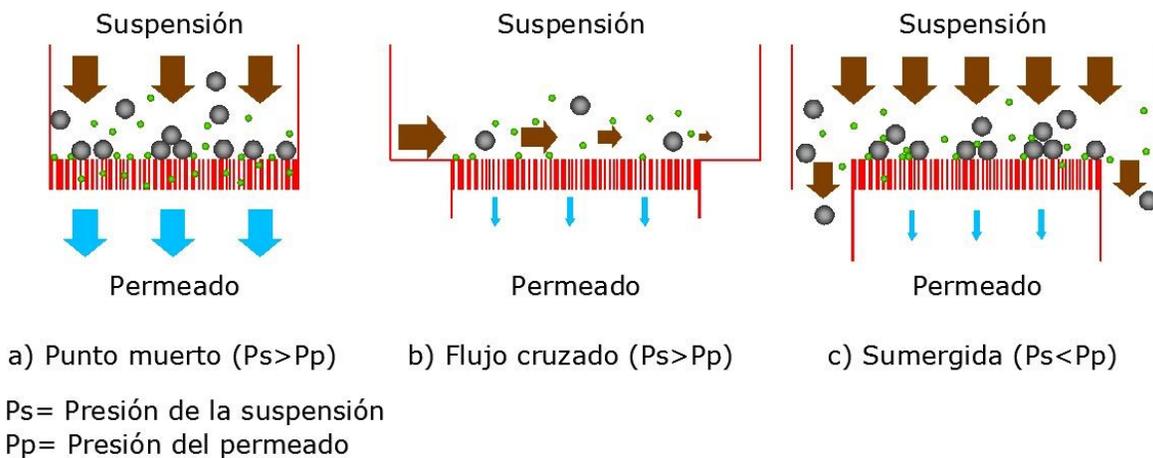


Figura 2.12 Tipos de filtración

### 2.5.3.2.2 TIPO Y CONFIGURACIÓN DEL BIOREACTOR

Con respecto a la configuración, en los estudios realizados al momento, los sistemas sumergidos prevalecen por su bajo costo inicial y de operación (Ersahin, *et al.*, 2012). Otra ventaja es que se reduce la energía para bombeo y la biomasa está sujeta a un esfuerzo cortante menor, por lo que se encuentra con un menor nivel de estrés. Sin embargo esto conlleva menores esfuerzos cortantes y en consecuencia, un menor valor de flux, por lo que se requiere mayor área de filtración (Stuckey, 2012).

De acuerdo a Alibardi y colaboradores, la selección del tipo de reactor afecta significativamente el desarrollo de la MD y su permeabilidad, sugiriendo que el uso de reactores UASB podría generar menor exposición de sólidos en el soporte y en la capa taponante, logrando valores más altos de flux durante la operación (Alibardi, *et al.*, 2014).

#### 2.5.3.2.3 FORMA DE OPERACIÓN

En la operación de un bioreactor de membranas existen dos parámetros dependientes el uno del otro, el flux y la PTM: uno de ellos se mantiene constante mientras que el otro varía en función del taponamiento de la membrana.

Por ejemplo, se puede definir operar un bioreactor de membrana a flux constante, obteniendo una productividad constante y predecible a expensas de un incremento de la PTM (y en consecuencia de la energía necesaria) causado por la reducción en la permeabilidad debida al taponamiento. En contraste, la operación a PTM constante, permite una operación estable en términos de PTM pero con una tendencia a la baja en el flux de permeado, ocasionada por la obstrucción de la membrana.

##### 2.5.3.2.3.1 FLUX CONSTANTE, PTM VARIABLE

El flux sostenible es el valor de flux con el cual ocurre un grado discreto de taponamiento que puede ser mitigado por los mecanismos de control del bioreactor de membrana, permitiendo corridas de filtración largas. La operación con un flux mayor provoca un aumento de la compresión de la capa depositada resultando en una reducción brusca de la permeabilidad (Petsev, *et al.*, 1993). El flux sostenible depende de las características del agua residual, del tipo de membrana y los parámetros de operación de sistema (Water Environment Federation, 2012).

El flux sostenible aplicado en la mayoría de los estudios de BRAM es menor a 15 L/m<sup>2</sup>h en contraste con los BRM aerobios, que cuentan con un intervalo de

operación de 25 a 140 L/m<sup>2</sup>h (Lin, *et al.*, 2013). Mediante la formación de una membrana dinámica anaerobia en un textil de poliéster de 61 µm de tamaño de poro, Zhang y colaboradores lograron un flux sostenido de 65 L/m<sup>2</sup>h (Zhang, *et al.*, 2010).

#### 2.5.3.2.3.2 PTM CONSTANTE, FLUX VARIABLE

La tendencia actual en la industria es operar a flux constante tanto para medio aerobio (Kraemer, *et al.*, 2012) como anaerobio (Lin, *et al.*, 2013) y como resultado hay pocos estudios en la operación a PTM constante.

La filtración con presión constante se caracteriza por un rápido descenso del flux al inicio de la filtración seguida por un descenso más gradual hasta que en algunos casos se alcanza un estado estable o pseudo estable (Bowen, *et al.*, 2001). En 2012, Ozdemir reportó que un reactor biológico con filtración por capa taponante (MD) mostró una tendencia a estabilizarse en un cierto valor de flux en la operación a largo plazo (4,000 horas) con un valor de PTM constante (Ozdemir, *et al.*, 2012). Esto podría ser un indicio de la operación de un BRAMD con corridas de filtración prolongadas, manteniendo presión y flux constante, no obstante, con una productividad muy baja.

Una ventaja del uso de la PTM constante en filtración con MD es que la fuerza motriz de la filtración puede ser llevada a cabo por presión hidrostática por lo que no se requiere de una bomba para filtrar la suspensión. Esto lo hace una alternativa para sistemas rurales donde se requiere un bajo costo de operación. En sistemas aerobios, se han empleado tirantes de agua desde 2 hasta 0.5 m (Kiso, *et al.*, 2005) o incluso menores.

El reto de esta forma de operación consiste en mantener, al menos, la calidad de permeado e incrementar el valor de flux a niveles competitivos con los sistemas aerobios comerciales de membranas sumergidas, es decir, entre 10 y 25 L/m<sup>2</sup>h

(Water Environment Federation, 2012) y con los valores más altos reportados en la literatura para medio anaerobio a escala laboratorio (65 L/m<sup>2</sup>h) (Zhang, *et al.*, 2011).

De acuerdo a Yu, el valor de la presión hidrostática tiene una importante influencia en la formación y operación estable del proceso y la selección del valor apropiado es de importancia en la investigación en membranas dinámicas. Si la presión hidrostática es mayor que la crítica, la capa taponante se compacta repentinamente y el flux decae, causando insuficiencia en la producción de agua (Yu & Dong, 2011).

#### 2.5.3.2.3.3 TRC y TRH

En un BRAM es necesario un valor alto de TRC para lograr el nivel de tratamiento requerido especialmente para temperaturas bajas, mientras que un bajo TRH es deseable para reducir el tamaño del reactor y en general el área de construcción del proceso.

En 2002, Chang y colaboradores sugirieron no considerar al TRC y al TRH como causas directas de taponamiento sino como parámetros que influyen en factores que están directamente relacionados con éste, como la concentración de SSLM, la DTP y la concentración de SPE (Chang, *et al.*, 2002). En particular, el TRC es un factor importante en la producción de SPE y en la formación y consolidación de la MD (Ersahin, *et al.*, 2014).

La disminución del TRH incrementa la viscosidad del lodo y la concentración de SPE (Meng, *et al.*, 2009) lo que acelera el taponamiento de la membrana. Por lo tanto es importante hacer una valoración entre el control del TRC y del TRH como medida de control del taponamiento (Smith, *et al.*, 2012).

#### 2.5.3.2.3.4 LIMPIEZA DE LA MEMBRANA DINÁMICA (MD)

En sistemas comerciales y de acuerdo al tratamiento de limpieza, el taponamiento se clasifica en: a) reversible físicamente: el cual es causado por partículas adheridas

laxamente y fáciles de limpiar mediante métodos físicos; b) reversible químicamente: el cual es más difícil de limpiar y remover ya que las partículas están adheridas con mayor fuerza en la superficie o dentro de los poros lo que hace necesaria una limpieza química; e c) irreversible: el cual es permanente y no puede ser retirado por medios físicos o químicos (Water Environment Federation, 2012). En la Tabla 2.2 se enlistan los métodos para reducir o controlar el taponamiento y mantener o restaurar la permeabilidad. Una limpieza adecuada emplea una combinación de ambas técnicas: física y química.

Tabla 2.2 Métodos de limpieza de membranas convencionales asociados a reactores anaerobios

Método	Tipo	Descripción
Limpieza mecánica	Físico	Limpieza manual o a chorro de agua
Inyección de biogás	Físico	Genera un esfuerzo cortante en la superficie de la membrana lo que reduce el taponamiento
Relajación	Físico	Pausado intermitente de la filtración, manteniendo inyección de biogás
Retrolavado	Físico	Aplicación de una corriente de agua (típicamente permeado) en dirección contraria al flux habitual para remover taponantes físicos
Limpieza química	Químico	Limpieza con soluciones de hipoclorito de sodio (para taponantes orgánicos); ácido cítrico o ácido oxálico (para taponantes inorgánicos) u otros minerales ácidos para restablecer el flux
Adición de adsorbentes y coagulantes	Químico	Reducen la concentración de PMS, en consecuencia reduciendo el taponamiento y mejorando el rendimiento de la membrana. Un ejemplo es la aplicación de carbón activado en polvo o granular

Con respecto a la limpieza de una MD, Al-Malack y Anderson efectuaron pruebas con distintos métodos de limpieza (con ácido, con agua potable, burbujeo de aire y filtración-intermitente) de una MD preformada que trataba agua residual doméstica. Encontraron que ninguno de ellos proporcionaba una limpieza efectiva sin alterar su desempeño y que la mejor solución fue remover por completo la MD para la formación de una nueva mediante cepillado y chorro de agua potable (Al-Malack & Anderson, 1997). Más recientemente, se determinó que el retrolavado de agua, con aire (en aplicaciones aerobias) o cepillado puede ser suficiente para la limpieza de

la MD sin el uso de agentes químicos (Chu, *et al.*, 2008). Tras un evento de limpieza, una MD puede ser re formada rápidamente a comparación de su formación inicial debido a que la capa gel que permanece después de la limpieza crea una superficie óptima para la re formación de la capa taponante (Fan & Huang, 2002).

#### 2.5.3.2.3.5 CONTROL DEL ESPESOR DE LA MD

La deposición y/o adsorción de sólidos subsecuente a la formación de la MD es indeseada ya que resulta en un incremento en la resistencia a la filtración, lo que deteriora el desempeño de la filtración dinámica (Liang, *et al.*, 2012). Es por ello que el control del grosor de la capa taponante es considerado de gran importancia para lograr una operación estable con un permeado de alta calidad (Ersahin, *et al.*, 2014) así como para mantener la PTM a niveles moderados (Jeison, *et al.*, 2008) en aplicaciones a flux constante.

En un experimento a PTM constante y en medio aerobio, Chu y Li observaron que una vez que el espesor de la capa dinámica se mantuvo “balanceado”, se observó una reducción en el declive del flux (Chu & Li, 2006).

### **2.5.3.3 CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE**

#### 2.5.3.3.1 CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA (COV)

Los procesos de BRAM pueden tolerar variaciones importantes de COV en el intervalo de entre 0.5 y 12.5 kg DQO/m<sup>3</sup>d, obteniendo una calidad de permeado excelente (Wen, *et al.*, 1999).

#### 2.5.3.3.2 RELACIÓN SUSTRATO/MICROORGANISMOS (F/M)

La relación F/M tiene un efecto significativo en el contenido y proporción de PMS: una relación F/M alta resulta en mayor concentración de SPE y PMS lo que contribuye a un taponamiento más severo (Liu, *et al.*, 2012) en un BRAM. No obstante, en filtración dinámica la relación F/M no representaría un cambio en la calidad del permeado de acuerdo a Ersahin (2014).

Así mismo, de acuerdo a Yin y colaboradores, la F/M influye en las propiedades de todo lo cual incide en el proceso de taponamiento, por lo que una relación F/M baja debe ser tomada en consideración para una operación sostenible de un BRAM (Yin, *et al.*, 2012).

#### **2.5.3.4 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO Y DE LA MEMBRANA O SOPORTE**

##### 2.5.3.4.1 CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO

Los módulos de hoja plana han tenido un interés especial en la comunidad científica, debido a sus ventajas de estabilidad y la facilidad de limpieza y reemplazo (Lin, *et al.*, 2013). Además proporcionan simplicidad operacional y facilidad de construcción (Ersahin, *et al.*, 2012)

##### 2.5.3.4.2 ENTRAMADO DE MATERIAL DE SOPORTE

En este factor se consideran las mallas y los textiles tejidos y no tejidos. Las mallas son una barrera permeable fabricada con una lámina de metal, fibra u otro material dúctil y flexible, con perforaciones (poros) adyacentes. Los materiales tejidos están elaborados de hilo mono o multifilamento y los no tejidos de una red de fibras que no son propiamente hilos y están unidas unas a otras de manera aleatoria. Los tipos de textil se presentan en la Figura 2.13:

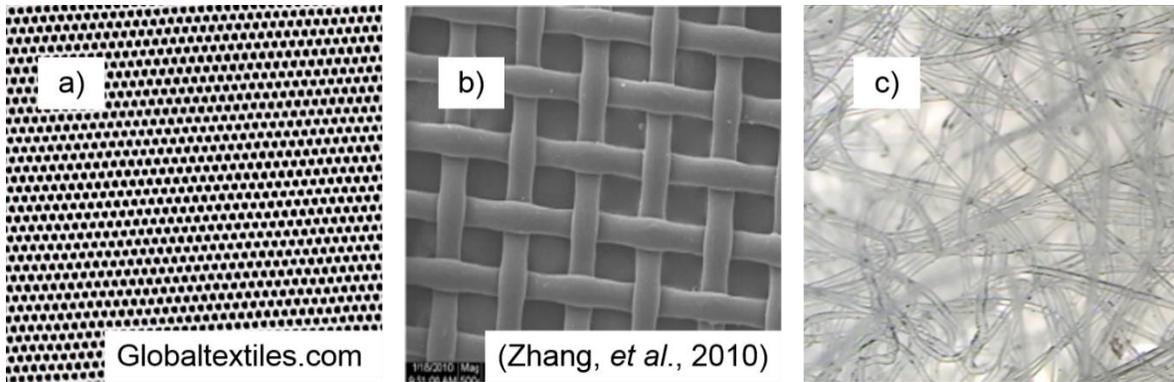


Figura 2.13 Tipos de entramado de textiles para material de soporte de la MD: a) malla; b) tejido; y c) no tejido.

La mayoría de los estudios con BRAMD se han realizado con el uso de mallas y solo un par con el uso de materiales no tejidos (Jeison, *et al.*, 2008) y (Ren , *et al.*, 2010), este último en medio aerobio.

Los materiales no tejidos poseen múltiples poros por los cuales el líquido puede fluir. Dado su tamaño relativamente grande de poro, se puede obtener un flux alto incluso con PTM bajas, algo deseable si se relaciona el incremento de la presión con el consumo energético, es decir mayor productividad con menor consumo de energía. El uso de estas telas ha sido calificado como aceptable (Asou, *et al.*, 1998) (Seo, *et al.*, 2003) obteniéndose valores de DQO hasta de 13 mg/L. Sin embargo, dada la naturaleza aleatoria de esta tela, el acoplamiento de las partículas de lodo en sus intersticios dificulta la operación a largo plazo (Kiso , *et al.*, 2005).

Ersahin y colaboradores (2012) también sugieren que la acumulación de lodo debido a la penetración de partículas finas en textiles no tejidos debe ser considerada en la operación a largo plazo, ya que es difícil remover estas partículas en la matriz del textil, incrementando la resistencia a la filtración (Ersahin, *et al.*, 2012). Aunque los resultados con estas telas han sido aceptables, en algunos casos no son comparables con las membranas convencionales y se espera que su vida útil sea menor (Meng, *et al.*, 2009).

#### 2.5.3.4.3 MATERIAL

El material de la membrana puede afectar las interacciones entre las especies microbianas y la superficie de la membrana y por ende el fenómeno de taponamiento (Gao, *et al.*, 2010). En lo que respecta a filtración dinámica, el soporte debe ser capaz de resistir la PTM durante largos periodos de tiempo, además del agresivo ambiente del agua residual y al mismo tiempo ser económico y de amplia disponibilidad.

Los materiales empleados en los estudios de filtración dinámica anaerobia se centran en el poliéster y polipropileno. En medio aerobio también han sido empleados nylon (Wang, *et al.*, 2012) y malla de acero (Chu, *et al.*, 2014).

El polipropileno es un material hidrófobo de bajo costo y como ventajas presenta que es químicamente resistente a la biodegradabilidad aunque es susceptible a la oxidación (Water Environment Federation, 2012; Ersahin, *et al.*, 2014). El poliéster es también un material económico y de amplia disponibilidad, que ha sido empleado como material de soporte para la formación de MD anaerobias (Zhang, *et al.*, 2011; Ozdemir, *et al.*, 2012; Poostchi, *et al.*, 2012).

#### 2.5.3.4.4 TAMAÑO DE PORO

La mayoría de las membranas convencionales comerciales emplean un intervalo de tamaño de poro de 0.01 a 0.4  $\mu\text{m}$ , un tamaño menor al de los flóculos y microorganismos, por lo que no es sorprendente la alta remoción de SST en BRM, con permeados virtualmente libres de patógenos. En contraste, el material de soporte para la formación de una MD se encuentra muy por encima del intervalo de microfiltración ( $>0.1 \mu\text{m}$ ) con tamaños de poro de decenas o hasta centenas de micrómetros. No obstante, el soporte debe tener un tamaño de poro apropiado para retener el material formador de la MD.

De manera intuitiva se podría afirmar que tamaños de poro menores llevarían a un flux menor y con mejor calidad de permeado. Sin embargo esto no se ha presentado en todos los trabajos realizados debido a la capa gel formada, la cual en un corto tiempo actúa como una membrana secundaria que puede incluso controlar el flux y la remoción de DQO. Por lo tanto cambios sustanciales en el tamaño de poro del soporte no siempre llevan a variaciones significativas en el flux o en el desempeño en la remoción de contaminantes (Stuckey, 2012).

De acuerdo con Chang y colaboradores, este comportamiento podría ser explicado por el taponamiento interno (Chang, *et al.*, 2002). Así mismo Park y otros reportaron que el tamaño de poro tuvo poca influencia en la tasa de filtración (Park, *et al.*, 2004), en concordancia con un estudio de Zhi-Guo y colaboradores en 2005, en el cual se determinó que el tamaño de poro de los materiales no tejidos tuvo un efecto mínimo en la remoción de carbono orgánico total debido a la formación de la membrana dinámica ya que el taponamiento fue causado principalmente por taponamiento interno (Zhi-Guo, *et al.*, 2005).

Así mismo, una revisión por Stuckey en 2012 encontró que no hay consistencia entre el tamaño de poro y el desempeño hidráulico (Stuckey, 2012) y esto es probablemente debido a la compleja y siempre cambiante naturaleza de la suspensión biológica en los BRM, a la hidrodinámica del sistema y a la duración de la prueba.

No obstante, hay conclusiones encontradas en la literatura respecto de la influencia de este factor. De acuerdo a Ersahin y colaboradores, el tamaño de poro sí interfiere en la formación de la membrana dinámica y en el flux del permeado, por lo tanto este factor debe ser considerado en conjunto con el tamaño de partícula del material formante para obtener un mejor desempeño en la separación (Ersahin, *et al.*, 2012). En 2000, Kiso y colaboradores investigaron las propiedades de filtración y la calidad del efluente en materiales de soporte de tipo malla con tamaño de poro de 100, 200 y 500 micrómetros, encontrando los mejores resultados en términos de calidad en

el tamaño en el textil de 100 micrómetros (Kiso, *et al.*, 2000). Por otro lado, Hwang y Cheng (2003) llegaron a una conclusión similar.

De acuerdo a Jeison y van Lier, en experimentos de filtración por lotes no fue posible formar una capa taponante en mallas con un tamaño de poro mayor de 60-70  $\mu\text{m}$ . Además, la capa formada bajo este intervalo dependió del tamaño de poro del soporte (Jeison, *et al.*, 2008). En 2010, Zhang logró la formación de una MD estable con una malla con tamaño de poro de 61  $\mu\text{m}$  (Zhang, *et al.*, 2010).

#### **2.5.4 DESEMPEÑO DE BIOREACTORES ANAEROBIOS DE MEMBRANA (BRAM) ACOPLADOS CON MD (BRAMD)**

En uno de los primeros trabajos en bioreactores anaerobios de membrana dinámica (BRAMD) Jeison y colaboradores reportaron que bajo condiciones termófilas y mesófilas, su sistema operó con flux bajo y de manera inestable y atribuyeron la diferencia con su contraparte aerobia a una distinta morfología y distribución de tamaño de partícula del lodo anaerobio así como a una mayor resistencia a la filtración. No obstante en los últimos años han surgido estudios que muestran a esta técnica como prometedora:

En 2011, Zhang y colaboradores operaron un reactor UASB de 45 L a un TRH de 8 h, con velocidad ascensional de 0.6 m/h y con un módulo de hoja plana fabricado de una tela tipo malla con un poro nominal de 61  $\mu\text{m}$ . Se empleó un flux constante y una alimentación de agua residual municipal real y el sistema se detenía al alcanzar una PTM de 25 kPa para limpiar la MD. Durante 11 meses de operación se obtuvo un flux de 65 L/m<sup>2</sup>h y una remoción de DQO en el permeado que resultó en concentraciones de  $63.4 \pm 11.8\%$  (Zhang, *et al.*, 2011).

Recientemente, Ma y colaboradores (2013) operaron un BRAMD en un reactor UASB a escala laboratorio durante 300 días, a un flux sostenido de 60 L/m<sup>2</sup>h y con un TRH de 2.2 horas. Como soporte se empleó malla de poliéster con un poro de 61  $\mu\text{m}$  y el influente fue agua residual municipal con una DQO de  $413.4 \pm 156.4$

mg/L. En ese estudio se logró una remoción de DQO total y soluble de 80.8% y 28.5%, respectivamente (Ma, *et al.*, 2013).

En 2014 Xie y su grupo de investigación operaron un BRAMD con un UASB escala piloto durante 142 días a un flux constante de 6 L/m<sup>2</sup>h para el tratamiento de lixiviados. El sistema operó con una variación de COV de 0.75 a 4.87 kg DQO/m<sup>3</sup>d y con una malla de dacron (poliéster) de 40 µm de tamaño de poro en un rango de temperatura mesófila. La DQO en el influente fue de alrededor de 13,000 mg/L y se obtuvo una remoción de 62.2% con un TRH de 25 días (Xie, *et al.*, 2014).

Por último, en 2014 Ersahin y colaboradores operaron un reactor anaerobio completamente mezclado, escala laboratorio acoplado con un soporte tejido de polipropileno de 10 µm. El experimento tuvo una duración de 140 días y una COV de 2 kg DQO/m<sup>3</sup>d con un TRH de 10 días. El sistema operó en un intervalo de temperatura mesófila y el influente fue agua residual sintética con una DQO de 20,100 ± 310 mg/L, logrando remociones >99% en DQO y turbiedad (Ersahin, *et al.*, 2014).

## CAPÍTULO 3

### 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Con los factores seleccionados (tamaño de poro del soporte y PTM) se realizó un diseño experimental factorial  $3^2$ , es decir, cada uno de los factores contó con tres niveles y un total de nueve combinaciones (tratamientos). Además, se probaron dos materiales de soporte: poliéster y polipropileno. Los factores y sus niveles se muestran en la Tabla 3.1:

*Tabla 3.1 Definición de factores y niveles de tratamiento que se emplearon en el diseño experimental*

Factor	Definición de la variable
Tamaño de poro del soporte	A= polipropileno y poliéster, 25 $\mu$ m B= polipropileno y poliéster, 50 $\mu$ m C= polipropileno y poliéster, 100 $\mu$ m
PTM	1= 12.8 kPa 2= 19.2 kPa 3= 25.6 kPa

La definición de los parámetros de operación por tratamiento se presenta en la Tabla 3.2 y una imagen esquemática se muestra en la Figura 3.1:

*Tabla 3.2 Definición de tratamientos aplicados a cada uno de los materiales*

Trat.	Parámetros	Trat.	Parámetros	Trat.	Parámetros
A1	25 $\mu$ m@12.8 kPa	B1	50 $\mu$ m@12.8 kPa	C1	100 $\mu$ m@12.8 kPa
A2	25 $\mu$ m@19.2 kPa	B2	50 $\mu$ m@19.2 kPa	C2	100 $\mu$ m@19.2 kPa
A3	25 $\mu$ m@25.6 kPa	B3	50 $\mu$ m@25.6 kPa	C3	100 $\mu$ m@25.6 kPa

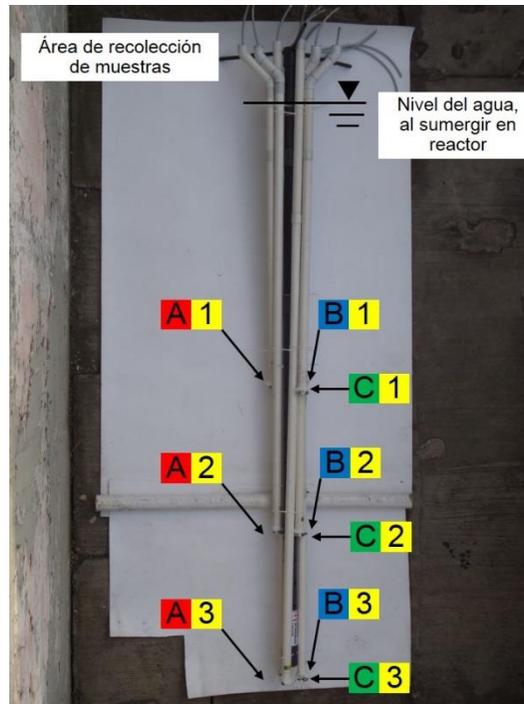


Figura 3.1 Esquema de la posición de los soportes para cada tratamiento

## 3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

Con el objetivo de controlar eficientemente el experimento, se dividió el proceso en un componente biológico (reactor UASB) y en el componente de filtración dinámica (soportes para la formación de la MD). En el primero se llevó a cabo la transformación biológica de los contaminantes y proporcionó un influente pre tratado a los soportes, los cuales efectuaron la separación sólido-líquido.

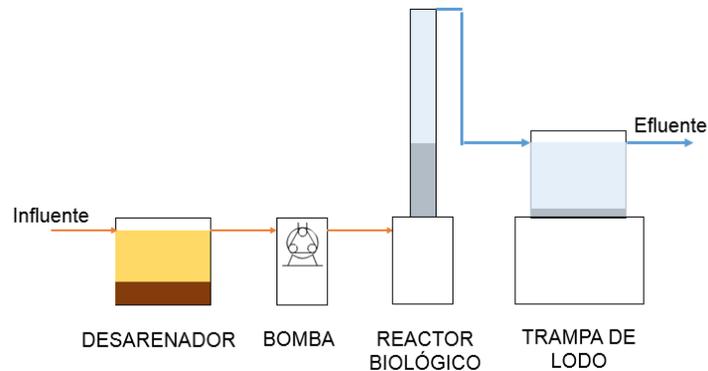
### 3.2.1 COMPONENTE BIOLÓGICO

El sistema biológico consistió en un reactor UASB escala piloto ubicado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cerro del Agua en Ciudad Universitaria, México D.F. El reactor fue alimentado con agua residual del campus universitario, fresca y sin recirculación durante la temporada de estiaje. Las características del influente a lo largo de los cuatro periodos experimentales se muestran en la Tabla 3.3:

*Tabla 3.3 Características del influente*

Parámetro, unidad	Valor
Caudal, L/min	1.5
SST, g/m <sup>3</sup>	274 ± 84 n=88
DQO <sub>t</sub> , g/m <sup>3</sup>	991 ± 274 n=88
Turbiedad, UTN	193 ± 52.4 n=88
Temperatura del reactor, °C	18-21
Temporada	Estiaje

El agua residual cruda se pasó por un desarenador antes de ser bombeada al reactor. El suministro del agua se realizó por medio de una bomba peristáltica Modelo HV-77410-10 Masterflex I/P, Cole-Parmer, EUA a un flujo de 1.5 L/min. El agua tuvo una velocidad de ascenso de 0.5 m/h y un TRH de 8 horas. El efluente fue recolectado para capturar la biomasa que pudiera haber escapado del reactor. El esquema de operación del sistema se muestra en la Figura 3.2:



*Figura 3.2 Esquema de funcionamiento del reactor UASB piloto empleado durante la experimentación (componente biológico)*

En la Tabla 3.4 se muestran las características y parámetros de operación del reactor UASB:

*Tabla 3.4 Información del reactor UASB*

Parámetro, unidad	Valor
Tipo de reactor	UASB
Tipo de agua tratada	Municipal
Velocidad ascendente, m/h	0.5
TRH, h	8
Temperatura del agua al interior del reactor, °C	Ambiente (18-21)
Dimensiones	
Diámetro, m	0.48
Altura efectiva, m	3.85
Volumen neto, m <sup>3</sup>	0.69
Tipo de lodo	Floculento
Volumen de lodo compacto, m <sup>3</sup>	0.144
Procedencia del lodo	Reactor UASB de la PTAR Municipal Querétaro Sur
Periodo de aclimatación de lodo, meses	~3 (previos a la experimentación)
Altura de la cama de lodo sin expansión, m	0.7
Altura de la cama de lodo con expansión, m	1.28
TRC, d	∞ (no hubo purga de lodo a excepción del extraído para muestreo)
SST en cama de lodos, g/L	66
SSV en cama de lodos, g/L	36

El reactor estuvo compuesto de un lecho de lodo anaerobio, la cual al encontrarse compacto ocupa aproximadamente 20% de la altura total; una zona de expansión variable (aproximadamente 15% de la altura) y una zona de sedimentación (el resto de la altura). Debido al arreglo experimental, durante las corridas se retiró el separador trifásico situado en la parte superior del reactor.

En la Figura 3.3 se muestra un esquema de los niveles de operación del reactor y de la ubicación de las estructuras de soporte para la formación de la MD con respecto a estos. Las estructuras de soporte se localizaron en la zona de sedimentación (en el tercio medio).

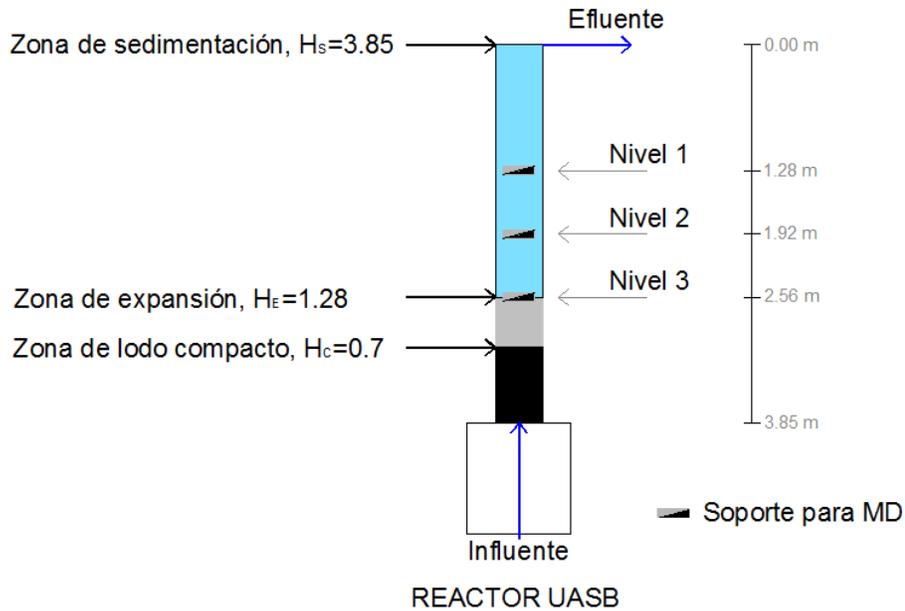


Figura 3.3 Niveles de operación del reactor y ubicación de los soportes

### 3.2.2 COMPONENTE DE FILTRACIÓN DINÁMICA

Con respecto a la elección del tamaño de poro del soporte se consideró un análisis previo de distribución de tamaño de partícula (DTP) del efluente del reactor en el cual se observó un diámetro predominante de entre 60 y 70  $\mu\text{m}$ . Esta distribución se puede observar en la Figura 3.4:

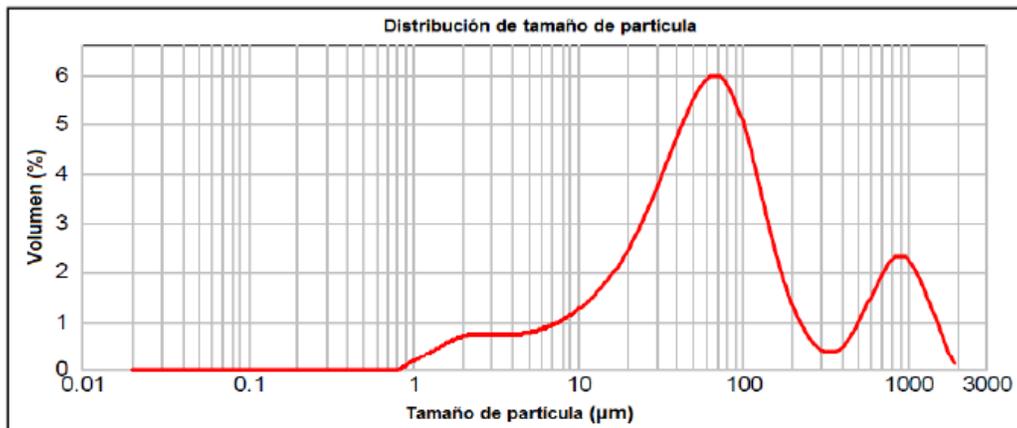
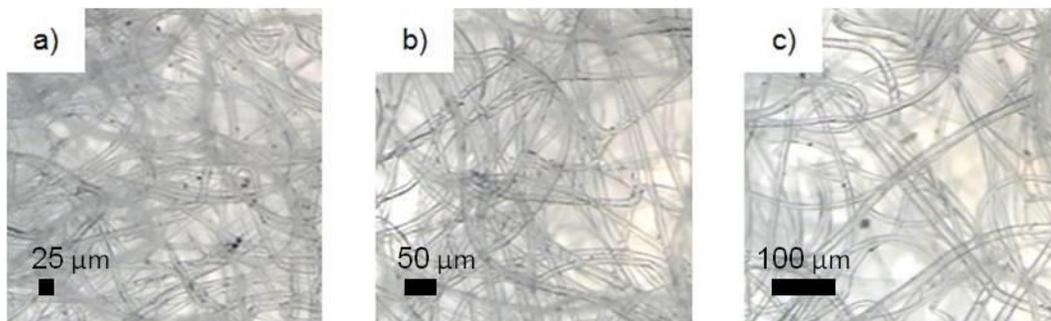


Figura 3.4 Distribución de tamaño de partícula en el efluente del reactor UASB (Cerón Vivas, 2013).

Cabe mencionar que tras esta prueba el reactor fue re inoculado con lodo anaerobio procedente de otra fuente, no obstante el estudio anterior fue el punto de partida para la selección del tamaño de poro del soporte utilizado en el presente trabajo.

Como estructura de soporte para la formación de la MD se emplearon textiles no tejidos de tipo industrial (Medios Filtrantes Industriales S.A.) de poliéster y polipropileno con un peso específico de  $339 \text{ g/m}^2$  y tres distintos tamaños nominales de poro (25, 50 y  $100 \mu\text{m}$ ) es decir, por encima y por debajo del diámetro predominante. Esta especificación fue garantizada por el proveedor. En la Figura 3.5 se muestra un acercamiento al material de polipropileno de distinto tamaño nominal de poro:



*Figura 3.5 Textil no tejido de polipropileno, a) 25  $\mu\text{m}$ ; b) 50  $\mu\text{m}$  y c) 100  $\mu\text{m}$ . Los textiles con poliéster presentaron la misma estructura*

Se cortaron círculos de cada uno de los textiles y se colocaron en los extremos de tuberías de PVCS con longitudes efectivas de 12.8, 1.92 y 2.56 m y de diámetro de 40 mm. Los valores de presión fueron definidos por la geometría del reactor y controlados mediante la altura de la columna hidrostática sobre los soportes. Se aseguraron los círculos con el tubo con una abrazadera de tornillo para forzar la entrada de agua a través del textil y evitar fugas. El área efectiva de filtración efectiva fue  $0.00125 \text{ m}^2$  por cada soporte. Para la recolección del permeado, en el interior del tubo se introdujo una manguera opaca de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro con una longitud de desarrollo hasta el espejo de agua del reactor más un bordo libre de 0.2 m.

### 3.3 ARRANQUE Y OPERACIÓN

#### 3.3.1 ARRANQUE

El resultado del montaje fue una estructura de soporte con las  $3^2=9$  superficies de soporte para la formación de la MD; es decir, tres distintos tamaños de poro del soporte a tres niveles de presión. Después la estructura fue sumergida dentro del reactor UASB (como se muestra en la Figura 3.6) ubicándose la zona de los textiles en la zona de sedimentación del reactor. Los soportes se ubicaron en un plano horizontal, es decir a una dirección normal al flujo ascendente del reactor (para operar en modo filtración sumergida).



*Figura 3.6 Parte superior de la estructura de soporte sumergida en el reactor*

Una vez sumergida la estructura de montaje, se colocó una plataforma de trabajo en la cual se ubicaron cuatro bombas peristálticas marca Masterflex modelo 7553-70 encendidas de manera continua para conducir el permeado hasta la zona de

recolección de muestras. Cada tratamiento contó con su propio cabezal de bombeo. Una imagen del experimento operando se muestra en la Figura 3.7:



*Figura 3.7 Montaje experimental operando y durante la toma de muestras*

Una vez montado el experimento se encendieron los equipos de bombeo para extraer el permeado del tubo de recolección. El sistema operó continuamente, 24 horas al día 7 días a la semana. Es importante recalcar que la función de los equipos de bombeo fue exclusivamente conducir el permeado desde el fondo del tubo de recolección hasta la zona de toma de muestra. Por lo tanto, la fuerza impulsora de la filtración dinámica fue la diferencia de presiones generada entre la columna de agua y el interior del tubo, el cual se encontraba a presión atmosférica. En la Figura 3.8 se muestra un diagrama conceptual del proceso de filtración:

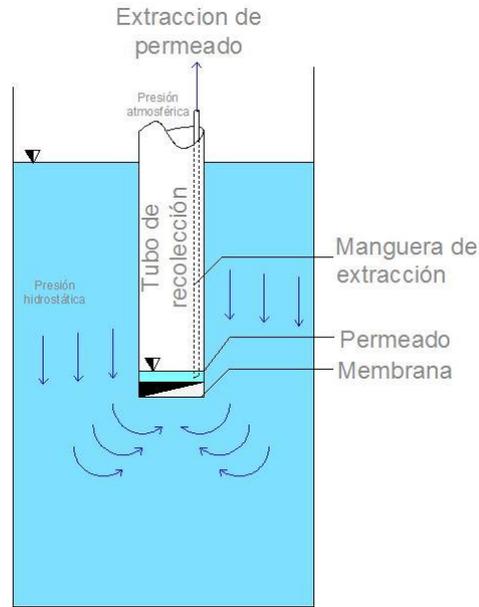


Figura 3.8 Operación de la membrana dinámica

### 3.3.2 OPERACIÓN

Es importante mencionar que al inicio de cada prueba cuando la estructura de soporte se encontraba completamente limpia, se contó con un gran volumen de permeado que llenó el tubo de recolección dado que el equipo de bombeo solo fue capaz de retirar una fracción del mismo. En consecuencia, durante las primeras horas de operación no se generó la PTM de diseño sino un valor sustancialmente más bajo. Esto también ocasionó que la velocidad de arrastre de sólidos del licor mezcla hacia el soporte fuera menor hasta la formación de una capa que alterara la permeabilidad sustancialmente, alrededor de 16 horas después de iniciada cada prueba.

A la hora 16 de operación, la permeabilidad del soporte se había reducido suficientemente para que la bomba mantuviera el tubo de recolección vacío, sin acumulación de permeado, y a presión atmosférica. Durante el transcurso de la prueba, la carga hidráulica sobre el soporte no se vio reducida por la extracción de permeado ya que este se vertía sobre el espejo de agua del reactor y era evacuado

junto con el resto del caudal tratado por el reactor UASB. En los momentos indicados se tomaba una muestra del permeado antes de verterlo a la superficie libre del reactor. Es importante mencionar que verter el permeado sobre el espejo de agua no fue en la práctica una recirculación dado que este volumen fue despreciable a comparación del caudal del influente del reactor y a que se vertió muy cerca del efluente del sistema y a 1.28 m del soporte más cercano.

Cada una de las cuatro corridas se dividió en tres ciclos de operación: el ciclo cero, con una duración de ~300 h, en el cual el soporte iniciaba la operación completamente limpio; y el primero y segundo, con una duración de ~150 h cada uno (ver Figura 3.9). En cada ciclo se evaluó el desempeño de la membrana después de ser limpiada. Así mismo, cada corrida consistió en un total de 22 lotes o puntos de información distribuidos entre los tres ciclos de operación.

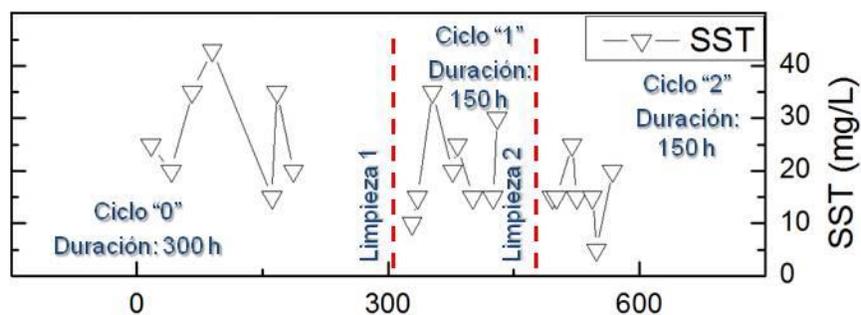


Figura 3.9 Esquema de operación por ciclos de una corrida tipo

Para verificar la reproducibilidad de los datos obtenidos, se efectuó una repetición de cada corrida para cada uno de los dos materiales, es decir se realizaron cuatro corridas en total, en cada una de las membranas de la Figura 3.1.

Cada corrida tuvo una duración aproximada de cuatro semanas y se alternó el material de soporte para evitar interferencias causadas por la composición cambiante del agua residual a lo largo de los casi cuatro meses de experimentación.

En la Tabla 3.5 se muestran las condiciones de operación de cada prueba:

*Tabla 3.5 Condiciones de operación por corrida experimental*

Corrida	Material	N	Duración, h	Mes	COV promedio del reactor kg DQO/m <sup>3</sup> d
01	PE	22	568	Diciembre	2.57 ± 0.71
02	PP	22	596	Enero	3.13 ± 0.94
03	PE	22	546	Febrero	3.63 ± 0.66
04	PP	22	614	Marzo	2.97 ± 0.65

Cada corrida concluyó al contar con un número de muestras apropiado para el análisis estadístico (n=22); no obstante, al momento de finalizar cada prueba, el sistema aún se encontraba completamente funcional y las membranas dinámicas continuaban produciendo permeado.

### **3.3.2.1 MUESTREO Y PARÁMETROS ANALIZADOS**

Cada una de las cuatro corridas experimentales consistió en 22 puntos de información con 13 muestras cada uno. Los puntos de muestreo durante la experimentación fueron el influente del reactor (1), el influente de cada uno de los niveles de operación (3) y los permeados correspondientes a cada membrana (9). Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los puntos de muestreo se muestran en la Figura 3.10.

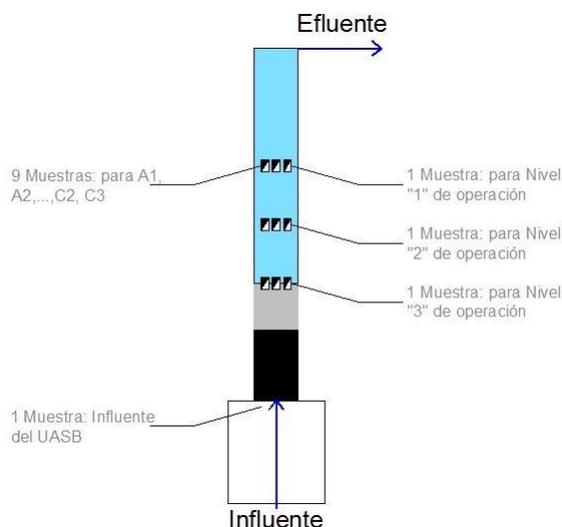


Figura 3.10 Puntos de muestreo durante la experimentación

Los parámetros determinados fueron: turbiedad, DQO total y soluble y SST según los métodos propuestos en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2012) y flux. Ocasionalmente se efectuaron pruebas de distribución de tamaño de partícula (DTP) y DBO de acuerdo al mismo estándar. En la Tabla 3.6 se muestran las especificaciones de los equipos y la técnica y las observaciones correspondientes a cada parámetro analizado.

Tabla 3.6 Especificaciones de los ensayos realizados

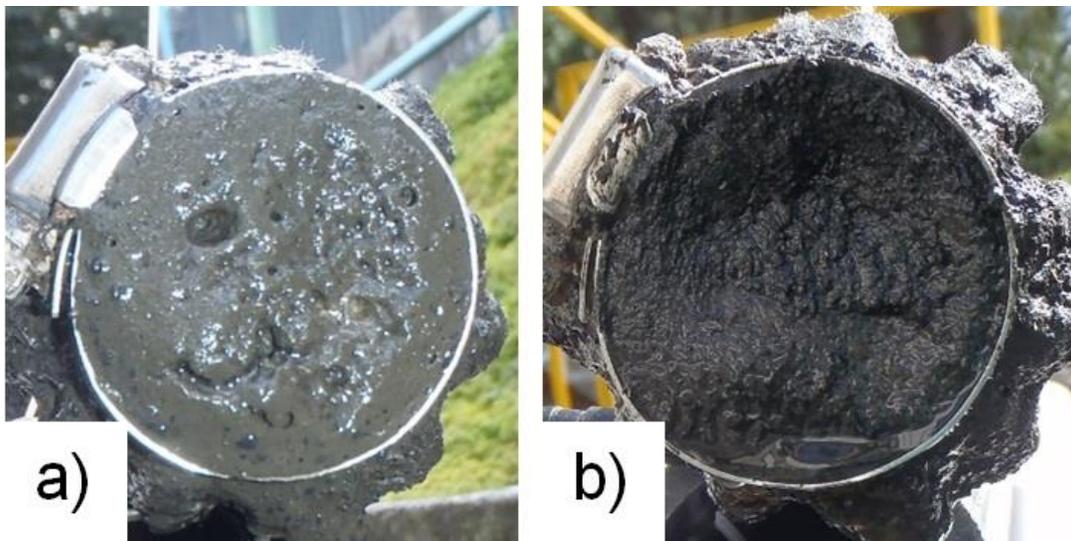
Ensayo	Equipo	Técnica (APHA, AWWA, WEF, 2012)
Turbiedad	HI93414 Hanna Instruments, EUA	2130 B.
Demanda química de oxígeno (DQO)	DRB2000, Hach, EUA 5000, Hach, EUA	5220 D.
Demanda biológica de oxígeno (DBO)	Oxitop IS6, Alemania	5210 D.
Sólidos suspendidos totales (SST)	Filtro GF/A Balanza analítica AP-110S, Ohaus, EUA	2540 D.
Distribución de tamaño de partícula (DTP)	Mastersizer 2000, Malvern, Reino Unido	2560 D.

Para la determinación de la DQO soluble se empleó un filtro de microfibra de vidrio tipo Whatman GF/A. La DQO del filtrado se consideró como fracción soluble. Las

muestras de los permeados se obtuvieron mediante su recolección en probetas y midiendo el tiempo requerido para llenar un volumen mínimo, de esta manera se calculó el valor de flux.

### **3.3.2.2 LIMPIEZA**

La limpieza tuvo el objetivo de restablecer la permeabilidad de los soportes para prolongar la duración de la filtración dinámica y consistió en extraer la estructura de montaje del reactor con los nueve módulos y aplicar una limpieza mecánica de la capa taponante con un chorro de agua. La limpieza fue aplicada de la misma manera (al mismo tiempo y de la misma forma) a las nueve membranas con el objeto de no interferir en el análisis estadístico de los datos. En la Figura 3.11 se muestra una imagen del soporte antes y después de la limpieza. Una vez realizado este proceso, se re introdujeron los nueve módulos y se dejó estabilizar el sistema por 16 horas. Cumplido este periodo se tomó el siguiente lote de muestras.



*Figura 3.11 Fotografía a) antes y b) después de la limpieza de la MD*

## **3.4 TÉRMINO DE LA PRUEBA Y TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Cada experimento terminó al contar con los 22 lotes de información. Después se extrajeron los módulos para realizarles una inspección visual y las membranas fueron deshidratadas mediante evaporación natural. Después de este proceso, en una de las pruebas se recortaron cuidadosamente cuadrados de 5x5 mm y se recubrieron con oro para ser examinadas en un microscopio electrónico de barrido (Jeol JSM-760F, Japón). Dado que la muestra no se encontraba húmeda, no fue necesario realizar un secado a punto crítico.

Dado que los datos obtenidos para cada variable respuesta (flux, turbiedad, DQO y SST) no pertenecían a una distribución normal y no eran independientes, para efectuar el análisis estadístico se empleó la técnica de análisis de varianza (ANOVA) de mediciones repetidas, la cual permite determinar diferencias significativas para los factores así como para las interacciones entre ellos considerando estas condiciones. El software empleado fue OriginLab Pro 8 (OriginLab Corp, EUA) y las diferencias se consideraron significativas en un intervalo de confianza del 95% con un valor ( $p < 0.05$ ).

## **CAPÍTULO 4**

### **4 RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSIÓN**

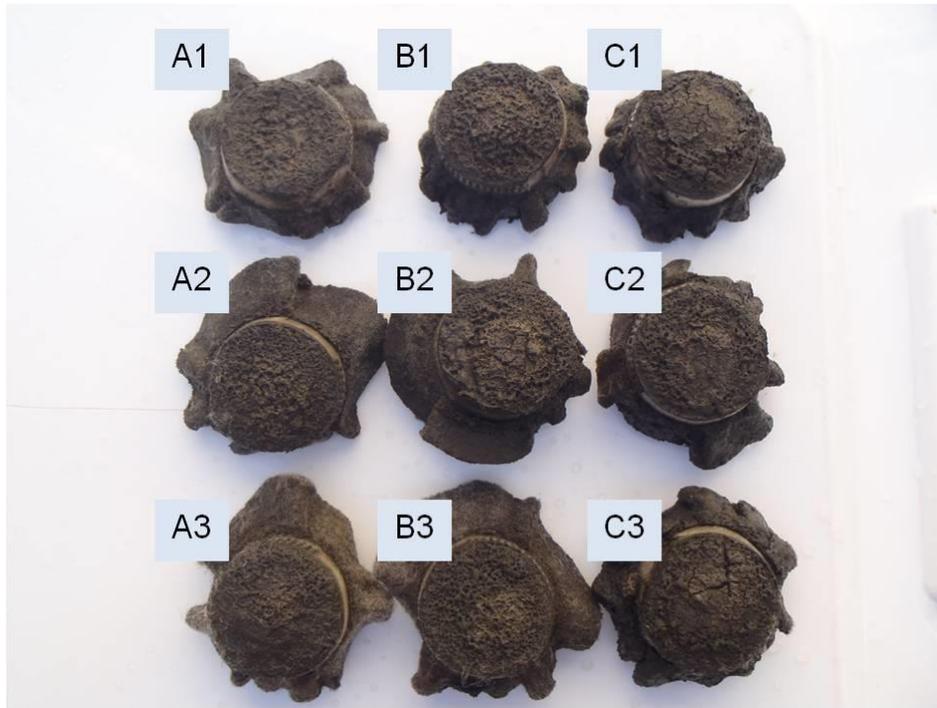
#### **4.1 RESULTADOS**

En el ANEXO A del disco compacto adjunto, se presentan los datos generados a lo largo de los cuatro experimentos. Así mismo, en el ANEXO B se presentan las series de tiempo del desempeño de los nueve distintos tratamientos para cada una de las cuatro variables de respuesta durante las cuatro corridas experimentales.

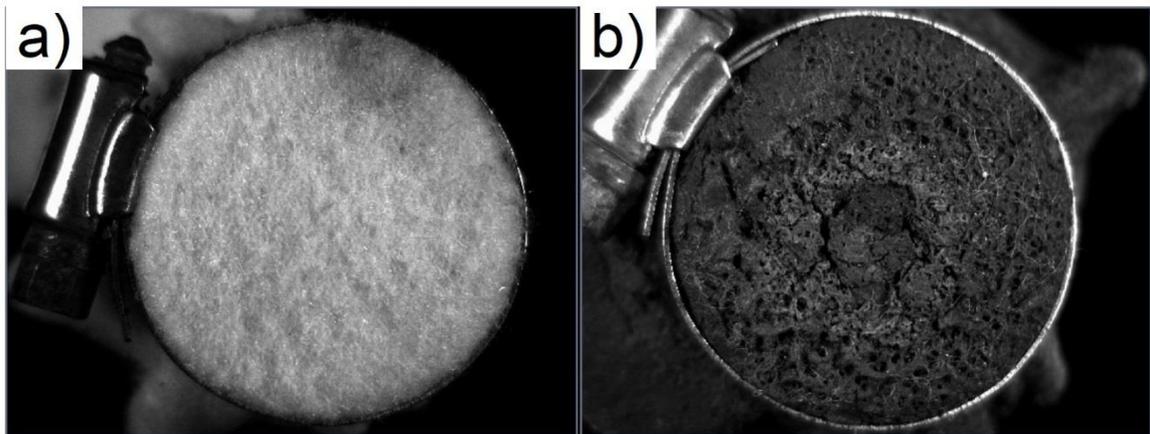
Es importante mencionar que el nivel “3” de operación (el más profundo) fue cubierto ocasionalmente por la zona de expansión del reactor debido a la alta generación de biogás del lecho de lodo. No obstante, se determinó que de acuerdo a los resultados observados, este hecho no tuvo influencia en el desempeño, como se demostrará en la sección de discusión.

##### **4.1.1 INSPECCIÓN MACRO Y MICROSCÓPICA**

Las nueve superficies de soporte de textil no tejido de polipropileno con la capa taponante resultante durante una de las corridas experimentales se muestran en la Figura 4.1. Así mismo en la Figura 4.2 se presenta un acercamiento a una de ellas (B2) antes y después de la experimentación:



*Figura 4.1 Membranas dinámicas formadas en una de las corridas experimentales*



*Figura 4.2 Soporte de polipropileno de 50  $\mu\text{m}$  a) antes de la filtración dinámica y b) una vez formada la MD con una columna hidrostática de 1.92 m*

En todas las pruebas y tratamientos se observó la formación de una capa de entre 3 y 5 mm de espesor. Al desmontar los soportes, en algunos casos se observó la presencia de una película formada en el lado del permeado (interior) de la superficie de soporte, como se muestra en la Figura 4.3. Esto probablemente fue causa de la

aparición ocasional de sólidos macroscópicos en el permeado, como se observa en la Figura 4.4.

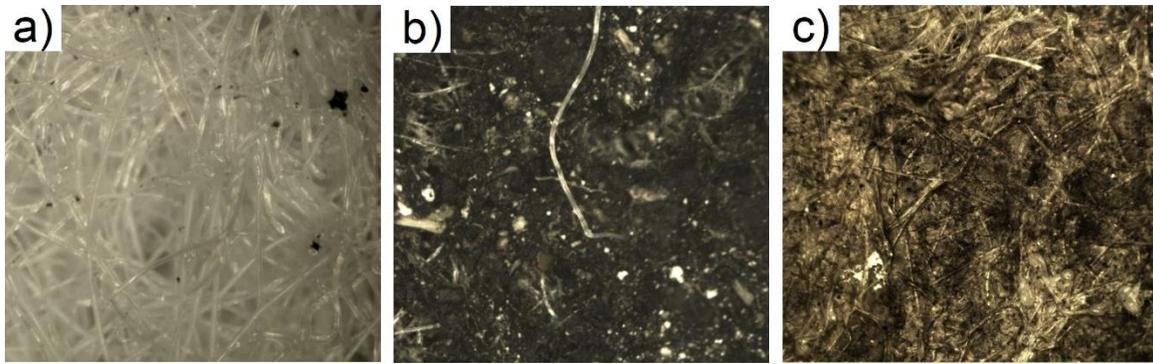


*Figura 4.3 Película formada durante la operación del lado del permeado*



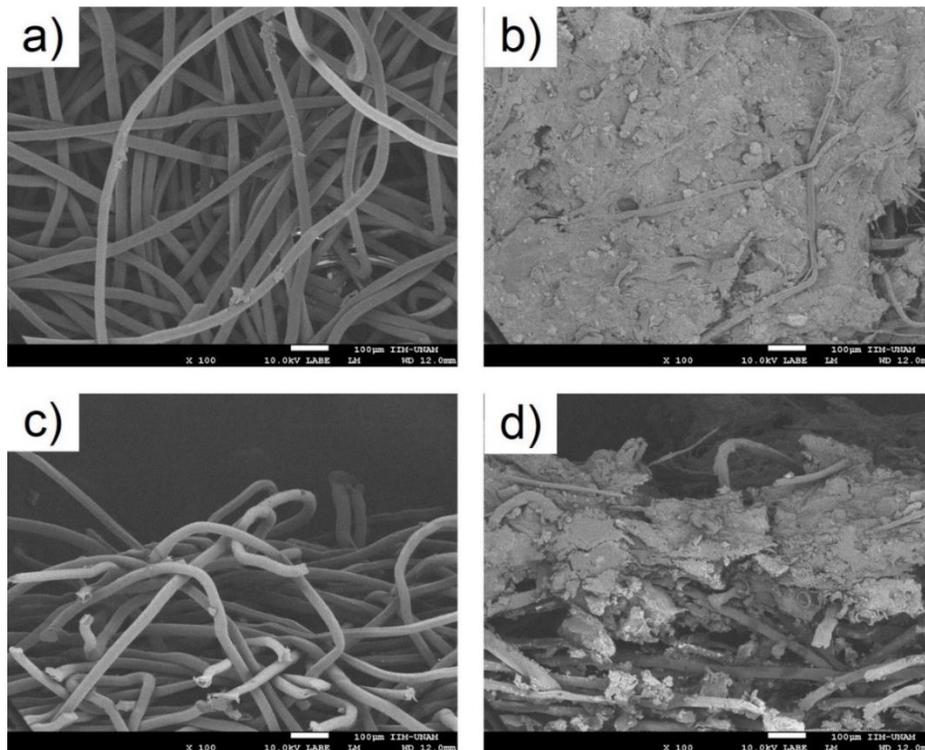
*Figura 4.4 Sólidos macroscópicos en una muestra de permeado*

En la Figura 4.5 se muestra una imagen con microscopio estereoscópico de la superficie de soporte limpia, la MD y la película formada del lado del permeado:



*Figura 4.5 Imágenes de: a) soporte limpio de poliéster de 50  $\mu\text{m}$ ; b) MD; y c) película formada del lado del permeado. Las últimas imágenes corresponden a 50  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro y a un PTM equivalente a un tirante de agua de 1.92 m*

Así mismo, en la Figura 4.6 se muestran las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Es importante observar que el corte transversal muestra la deposición de material sobre el soporte y en sus intersticios.



*Figura 4.6 Imágenes de microscopio electrónico de barrido (MEB), a) soporte limpio de polipropileno de 50  $\mu\text{m}$ ; b) soporte con la MD formada; c) soporte en corte limpio y d) corte de la MD formada, las últimas dos imágenes corresponden a un tamaño de poro de 50  $\mu\text{m}$*

#### 4.1.2 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP) DEL PERMEADO

Se efectuó una prueba de DTP a una muestra de permeado del tratamiento B2 y se determinó un valor de tamaño medio de partícula  $d(0.5)=5.646 \mu\text{m}$ , un orden de magnitud menor al tamaño de poro del soporte ( $50 \mu\text{m}$ ). Así mismo, se observa que la DTP del permeado se encontró en un intervalo estrecho entre  $3$  y  $10 \mu\text{m}$ . La DTP se observa en la Figura 4.7:

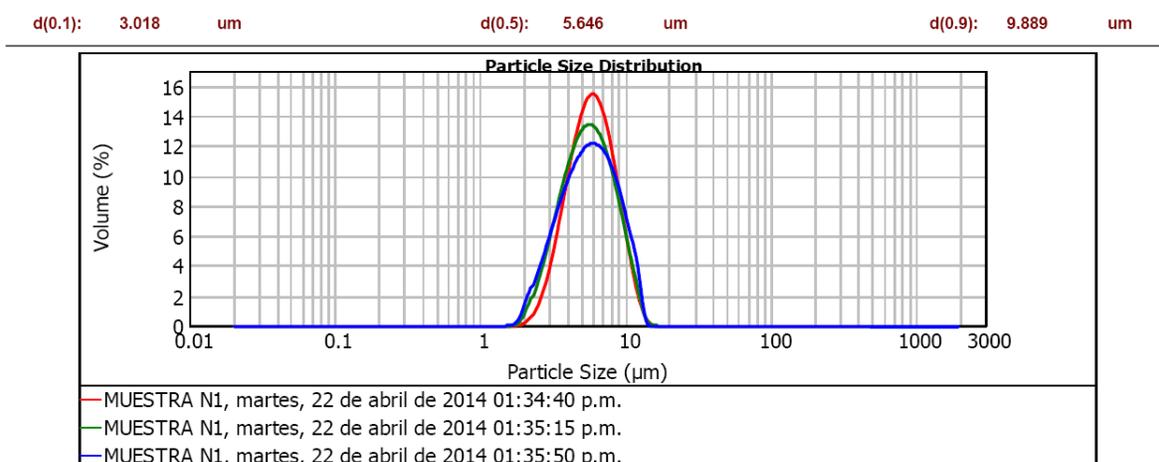


Figura 4.7 DTP del permeado B2 (tamaño de poro de  $50 \mu\text{m}$  y PTM equivalente a tirante de agua de  $1.92 \text{ m}$ ) de una de las pruebas. Cada curva representa una repetición de la misma muestra

#### 4.1.3 TENDENCIAS POR CICLO DE OPERACIÓN

El estudio del comportamiento de cada parámetro por ciclo de operación ayuda a definir los posibles alcances y limitaciones de esta tecnología en su operación a largo plazo. A continuación se presentan las tendencias observadas en el comportamiento de la filtración dinámica realizada en este experimento. Las gráficas presentadas incorporan la información de las cuatro pruebas realizadas en una sola figura. Se presenta una figura para cada variable respuesta.

A lo largo de las corridas, el flux disminuyó de forma notable durante el ciclo de operación "0", con el soporte limpio (ver Figura 4.8), lo que es consistente con la

dinámica de formación de la MD. Al inicio del ciclo “1” se observó un incremento en el valor de flux (con respecto a los últimos valores del ciclo “0”) sin embargo este no fue tan alto como el valor inicial del ciclo “0” de cada prueba debido a que la limpieza solo removi6 la capa taponante superficial. No obstante, en el 6ltimo ciclo el incremento en el valor inicial no fue tan evidente. En todos los ciclos se observ6 una marcada tendencia a la disminuci6n del flux conforme transcurri6 la filtraci6n.

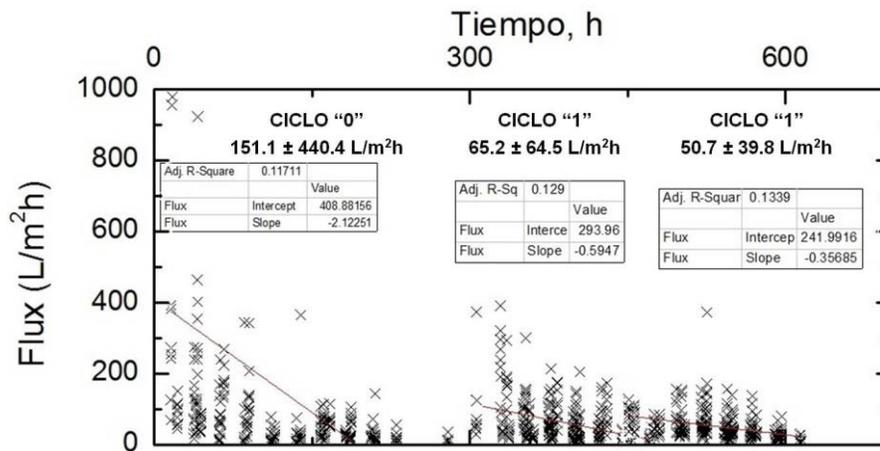


Figura 4.8 Tendencia del flux (se muestran todos los datos obtenidos durante los cuatro experimentos)

Al igual que el flux, la turbiedad de permeado mostr6 una clara tendencia de reducci6n en el ciclo “0”, el periodo de inicio de la filtraci6n. En los ciclos subsecuentes se mostr6 una tendencia a obtener valores estables aparentemente sin afectaciones mayores por la limpieza. No obstante, los valores obtenidos en los ciclos “1” y “2” fueron en general mayores a los observados al final del ciclo “0”, como se observa en la Figura 4.9:

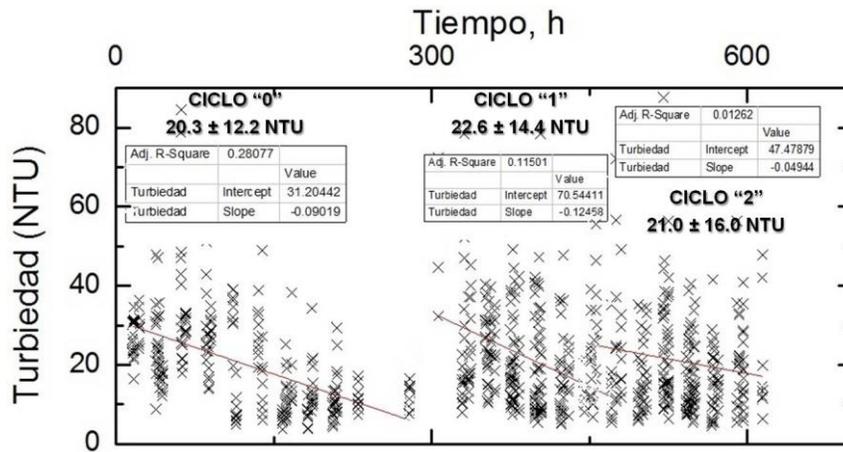


Figura 4.9 Tendencia de la turbiedad de permeado en las cuatro pruebas a lo largo de la operación

En lo que respecta a la DQO, se mostró una cierta tendencia en obtener permeados más limpios conforme transcurrió el ciclo cero. Así mismo, en el ciclo “1” se observó una muy ligera tendencia a la reducción de DQO en el permeado (en contraste con el ciclo “2”). Sin embargo, se obtuvieron promedios mayores a los últimos valores observados en el ciclo cero y una mayor dispersión de los datos en el ciclo “2”. Ver Figura 4.10.

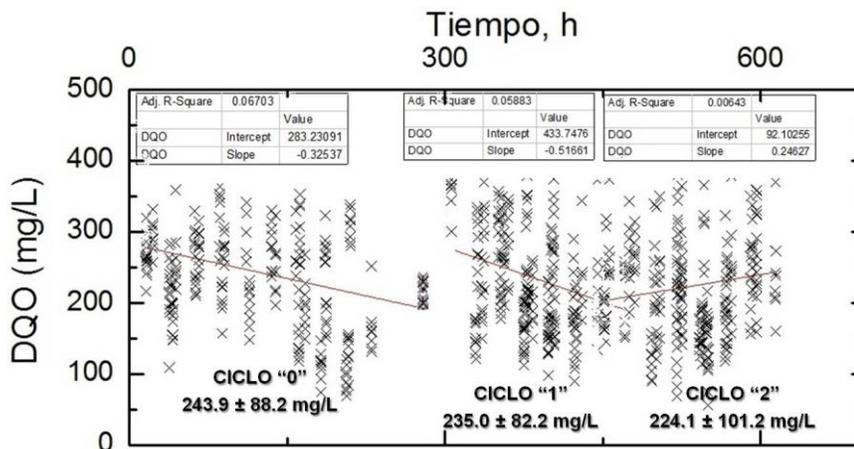


Figura 4.10 Tendencia de la DQO del permeado en las cuatro pruebas a lo largo de la operación

De igual manera a lo observado en la turbiedad y DQO, para los SST se observó una tendencia a la baja en el ciclo cero, aunque menos marcada. En los ciclos “1” y “2” se observaron valores relativamente estables aparentemente sin ser afectados sustancialmente por la limpieza mecánica. Al igual que la DQO, se observó una mayor dispersión de los datos en el último ciclo, como se observa en la Figura 4.11:

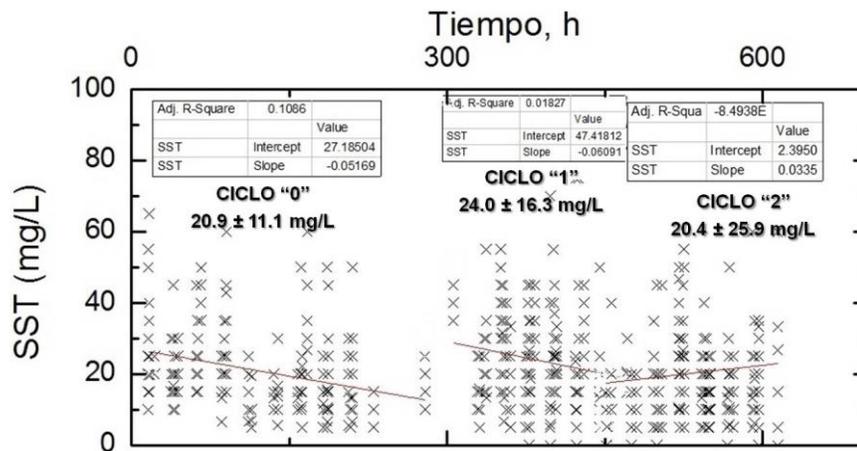


Figura 4.11 Tendencia de los SST en el permeado en las cuatro pruebas a lo largo de la operación

#### 4.1.4 TIEMPOS DE FORMACIÓN Y FILTRACIÓN EFECTIVA

A pesar de que una capa taponante dinámica se forma incluso en minutos, una formación efectiva que genere una remoción y calidad estable requiere más tiempo (Ersahin, *et al.*, 2014). De acuerdo a Liang, la formación de la MD concluye al alcanzar una concentración de SST de aproximadamente cero (Liang, *et al.*, 2013). En este trabajo, el tiempo de formación se consideró como el tiempo en que el tratamiento se demoró en producir permeado con una concentración de SST  $\leq 5$  mg/L. Así mismo, el tiempo de filtración efectiva fue aquel en el que se mantuvo esta condición y además un valor de flux  $\geq 25$  L/m<sup>2</sup>h, uno de los estándares de la industria

de los BRM de acuerdo a (Water Environment Federation, 2012). En la Figura 4.12 se aprecian los tiempos de formación y de filtración efectiva:

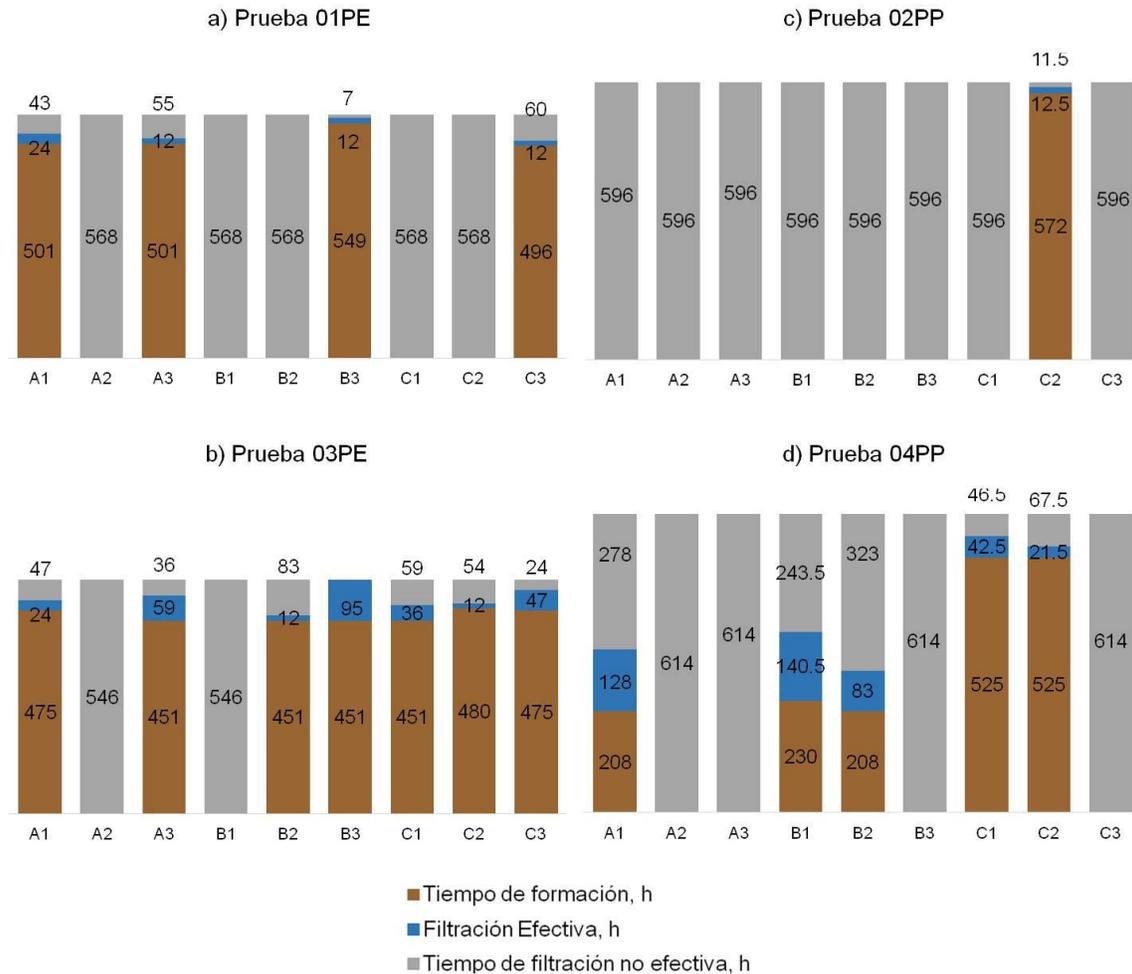


Figura 4.12 Tiempos de formación de MD y filtración efectiva de las pruebas a) 01PE; b) 03PE; c) 02PP; y d) 04PP

Con base en la gráfica anterior, se aprecia que varios tratamientos no cumplieron en ningún momento con las especificaciones y en consecuencia no se presentó un tiempo de formación ni de filtración efectiva de acuerdo a los criterios definidos. En la Tabla 4.1 se presenta la información obtenida relativa a tiempos de formación y filtración para poliéster y en la Tabla 4.2 para polipropileno:

*Tabla 4.1 Tiempos de formación y filtración efectiva para poliéster*

Tratamiento	Tiempo de formación promedio, h	Tiempo de filtración efectiva promedio, h	Reproducibilidad: número de corridas con TFE	Tiempo de filtración efectiva en las 2 corridas, h	Posición considerando reproducibilidad, y TFE en las 2 corridas
A1	488	24	2 de 2	48	4
A2	-	0	0 de 2	0	8
A3	476	35.5	2 de 2	71	2
B1	-	0	0 de 2	0	8
B2	451	12	1 de 2	12	6
B3	500	53.5	2 de 2	107	1
C1	451	36	1 de 2	36	5
C2	480	12	1 de 2	12	7
C3	485.5	29.5	2 de 2	59	3
Promedio	475.93	28.93	No aplica	38.33	No aplica

Con respecto al poliéster, el tratamiento con el mejor desempeño fue el B3, con periodos de filtración efectiva durante las dos pruebas por un total de 107 horas. Así mismo, los tratamientos A3; C3; y A1, también mostraron periodos con filtración efectiva en ambas pruebas, no obstante con una duración promedio menor. Los peores tratamientos para este material fueron el A2 y el B1, los cuales no presentaron periodos con filtración efectiva.

*Tabla 4.2 Tiempos de formación y filtración efectiva para polipropileno*

Tratamiento	Tiempo de formación promedio, h	Tiempo de filtración efectiva promedio, h	Reproducibilidad: número de corridas con TFE	Tiempo de filtración efectiva en las 2 corridas, h	Posición considerando reproducibilidad, y TFE en las 2 corridas
A1	208	128	1 de 2	128	3
A2	-	-	0 de 2	0	6
A3	-	-	0 de 2	0	6
B1	230	140.5	1 de 2	140.5	2
B2	208	83	1 de 2	83	4
B3	-	-	0 de 2	0	6
C1	525	42.5	1 de 2	42.5	5
C2	370	17	2 de 2	34	1
C3	-	-	0 de 2	0	6
Promedio	308.17	82.20		47.56	

De la misma manera, los resultados del polipropileno señalan que el tratamiento C2 presentó la mejor reproducibilidad con los periodos de filtración más largos. Así mismo, las membranas B1; A1; y B2 mostraron periodos de filtración únicamente en una de las pruebas. Los peores tratamientos fueron A2; A3; B3 y C2, sin tiempos de filtración efectiva.

#### **4.1.5 EFECTO EN LA REMOCIÓN DE DQO SOLUBLE**

Es importante señalar que en todos los tratamientos, la MD retuvo mayoritariamente la DQO particulada dejando prácticamente sin tratamiento la fracción soluble en el permeado. Durante el transcurso de la experimentación se tomaron muestras aleatorias a la DQO soluble en el interior del reactor UASB al nivel de contacto con la MD y a la DQO soluble del permeado de la misma. Debido a que estos análisis fueron realizados de forma aleatoria durante los cuatro meses de experimentación, solo cuatro puntos fueron sujetos de comparación.

Tomando como referencia la Figura 4.13, la altura total de la barra representa la DQO soluble de una muestra del interior del reactor. La fracción clara de las barras es la DQO soluble registrada en el permeado y la fracción oscura es la DQO soluble retenida por la MD. Es importante resaltar que la fracción soluble que ingresa a la membrana permanece prácticamente sin cambio y su valor se reduce de forma muy limitada (menos de 10%) después de la filtración. Así mismo,  $73.4 \pm 14.7\%$   $n=46$  de la DQO de los permeados se encontró en forma soluble.

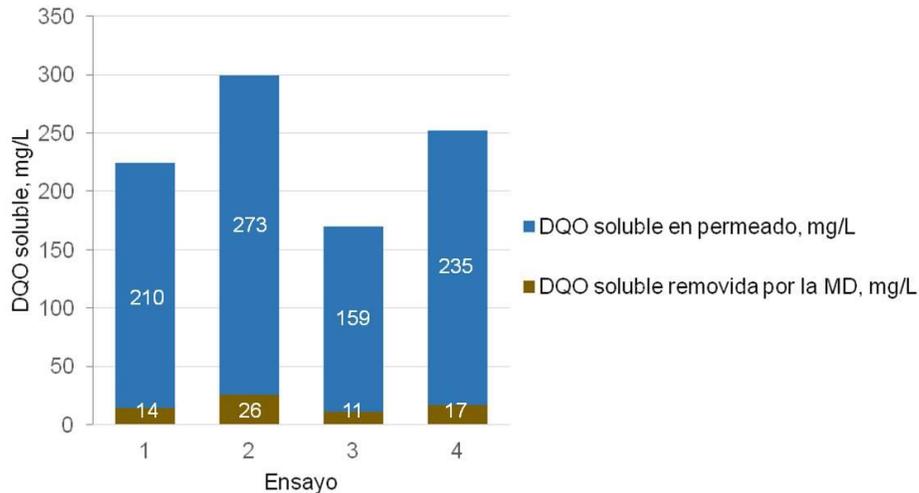


Figura 4.13 Proporción de DQO soluble

#### 4.1.6 PRUEBAS DE SIGNIFICANCIA

Mediante la técnica ANOVA de mediciones repetidas, las variables respuesta fueron evaluadas con un tamaño de muestra  $n=22$  y un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  para corroborar si los efectos principales e interacciones resultaron estadísticamente significativas o no. En la Figura 4.14 se muestran los valores-P para cada prueba, parámetro y factor. Los resultados del análisis se resumen en la Figura 4.15 para poliéster y en la Figura 4.16 para polipropileno:

Prueba	Poliéster				Poliéster (repetición)				Polipropileno				Polipropileno (repetición)			
Parámetro	FLUX	TURB	DQO	SST	FLUX	TURB	DQO	SST	FLUX	TURB	DQO	SST	FLUX	TURB	DQO	SST
TP	0.093	0.030	0.284	0.736	0.039	0.643	0.181	0.352	0.057	0.382	0.526	0.226	0.001	0.017	0.901	0.049
PTM	0.024	0.007	0.637	0.609	0.564	0.065	0.002	0.041	0.036	0.000	0.028	0.000	0.000	0.021	0.064	0.013
INT	0.000	0.001	0.093	0.193	0.014	0.010	0.067	0.308	0.002	0.000	0.026	0.000	0.008	0.084	0.073	0.005

TP: tamaño de poro del soporte

PTM: presión transmembrana

INT: interacción TP + PTM

Nota: un valor  $P < 0.05$  se considera significativo

Figura 4.14 Valores-P obtenidos por prueba y por repetición

Factor	Productividad			Calidad								
	Flux	Prueba de significancia		Turb.	Prueba de significancia		DQO	Prueba de significancia		SST	Prueba de significancia	
TP	IND	Indefinido*		IND	Indefinido		✗	No significativo		✗	No significativo	
PTM	IND	Indefinido		IND	Indefinido		IND	Indefinido		IND	Indefinido	
INT	✓	Significativo		✓	Significativo		✗	No significativo		✗	No significativo	

Trat.	Promedio, L/m <sup>2</sup> h			Lugar	Promedio, UTN			Lugar	Promedio, mg/L			Lugar	Promedio, mg/L			Lugar
	Prueba 1	Prueba 3	Prom.		Prueba 1	Prueba 3	Prom.		Prueba 1	Prueba 3	Prom.		Prueba 1	Prueba 3	Prom.	
A1	101.9	26.0	64.0	8	18.8	17.4	18.1	1	215	228	222	1	25.9	12.7	19.3	2
A2	104.5	23.1	63.8	9	19.3	33.1	26.2	9	232	332	282	9	29.8	33.9	31.9	9
A3	176.7	59.8	118.3	6	17.7	22.4	20.1	3	212	304	258	7	31.4	18.2	24.8	6
B1	229.7	55.6	142.7	5	17.9	32.9	25.4	8	195	256	226	2	25.5	15.6	20.6	3
B2	232.5	62.3	147.4	4	17.1	21.2	19.2	2	224	279	252	6	33.9	17.5	25.7	7
B3	175.6	39.8	107.7	7	16.5	24.6	20.6	4	189	290	240	4	21.3	15.9	18.6	1
C1	264.1	43.5	153.8	3	28.2	19.4	23.8	7	188	281	235	3	25.5	16.0	20.8	4
C2	332.4	35.7	184.1	1	14.4	32.6	23.5	6	174	324	249	5	22.8	25.6	24.2	5
C3	325.4	40.2	182.8	2	22.4	22.6	22.5	5	233	294	264	8	34.3	23.0	28.7	8

\* Indefinido: no fue posible determinar si el factor fue o no significativo debido a los resultados encontrados en las repeticiones

Turb: Turbiedad

Prom: Promedio

TP: Tamaño de poro del soporte

PTM: Presión transmembrana

INT: Interacción

Figura 4.15 Resumen de pruebas de significancia estadística para poliéster

Factor	Productividad			Calidad								
	Flux	Prueba de significancia		Turb.	Prueba de significancia		DQO	Prueba de significancia		SST	Prueba de significancia	
TP	IND	Indefinido*		IND	Indefinido		✗	No significativo		IND	Indefinido	
PTM	✓	Significativo		✓	Significativo		IND	Indefinido		✓	Significativo	
INT	✓	Significativo		IND	Indefinido		IND	Indefinido		✓	Significativo	

Trat.	Promedio, L/m <sup>2</sup> h			Lugar	Promedio, UTN			Lugar	Promedio, mg/L			Lugar	Promedio, mg/L			Lugar
	Prueba 2	Prueba 4	Prom.		Prueba 2	Prueba 4	Prom.		Prueba 2	Prueba 4	Prom.		Prueba 2	Prueba 4	Prom.	
A1	57.6	66.0	61.8	3	14.6	18.3	16.5	2	201	203	202	1	19.0	12.0	15.5	1
A2	44.4	19.3	31.9	7	15.9	29.9	22.9	8	219	254	237	8	23.2	27.0	25.1	9
A3	46.7	6.5	26.6	9	33.6	16.0	24.8	9	242	191	217	4	26.1	10.8	18.5	5
B1	61.8	68.3	65.1	2	18.8	13.9	16.4	1	238	215	227	7	21.3	11.6	16.5	2
B2	69.6	81.5	75.6	1	19.3	17.6	18.5	3	210	218	214	3	24.1	14.5	19.3	6
B3	42.6	17.9	30.3	8	23.0	18.2	20.6	5	225	219	222	6	23.5	12.9	18.2	4
C1	57.8	37.6	47.7	5	21.5	21.7	21.6	6	219	205	212	2	25.9	15.9	20.9	7
C2	90.2	33.4	61.8	4	17.5	23.1	20.3	4	210	234	222	5	19.1	17.2	18.2	3
C3	55.2	15.9	35.6	6	27.8	17.4	22.6	7	265	217	241	9	31.8	18.0	24.9	8

\* Indefinido: no fue posible determinar si el factor fue o no significativo debido a los resultados encontrados en las repeticiones

Turb: Turbiedad

Prom: Promedio

TP: Tamaño de poro del soporte

PTM: Presión transmembrana

INT: Interacción

Figura 4.16 Resumen de pruebas de significancia estadística para polipropileno

La variación en las repeticiones para cada material ocasionó que algunas pruebas de significancia estadística resultaran positivas en una corrida pero negativas en la

repetición o viceversa. En esos casos no fue posible definir la significancia del factor y solo cuando las dos corridas para cada material generaron resultados de significancia iguales, se consideró el factor como significativo o no significativo.

Una de las motivaciones al elegir el diseño experimental de este trabajo fue conocer el efecto que tienen las interacciones de los factores en la operación de la MD. Los resultados muestran que en varios casos las interacciones tienen un efecto significativo, es decir que cierto valor de tamaño de poro del soporte y cierto valor de PTM generan un efecto sinérgico para el mejor o peor desempeño de la MD.

El factor tamaño de poro mostró resultados ambiguos (en algunos casos significativos y en otros no) y por ello no fue posible definir su significancia estadística en cuanto a su influencia en el flux para ambos materiales. Con respecto al polipropileno, se observó un menor valor de flux en el nivel "3", a 25.6 kPa. Así mismo, la interacción entre los dos factores fue significativa y generó mayor volumen de permeado en los tratamientos B2 y C2 para ambos materiales y además en el A1 para polipropileno y A3 para poliéster.

Con respecto a los parámetros de calidad del permeado, también se mostraron resultados ambiguos y varias pruebas de significancia fueron catalogadas como indefinidas. No obstante, con respecto al poliéster, la interacción entre los factores fue significativa para la turbiedad y el análisis estadístico fue capaz de identificar a los permeados con mayor turbidez: A2, B1 y C1. Para DQO y SST el tamaño de poro y la interacción tamaño de poro-PTM no fueron significativas.

En relación con el polipropileno se identificó que el nivel de PTM "2" y "3" produjeron los permeados más turbios y con mayor concentración de SST. Así mismo, con respecto a los SST la interacción entre ambos factores también fue significativa y los permeados de los tratamientos A2 y C3 fueron los más sucios. Respecto a la DQO, el factor tamaño de poro fue no significativo.

En síntesis, el análisis estadístico fue capaz de encontrar diferencias significativas e identificar a los mejores tratamientos en términos de productividad (B2 y C2) así como a los peores en términos de calidad: A2, B1, C1 y C3.

Es de resaltar que los tratamientos con los valores más altos de flux (B2 y C2, para ambos materiales) no generaron los permeados de la peor calidad. Además, con respecto a la Figura 4.15 y Figura 4.16, es notable que la repetición realizada con polipropileno muestra valores muy parecidos a la primera prueba, a diferencia de las corridas efectuadas con poliéster donde las diferencias entre las variables respuesta (fundamentalmente flux) se acentúan. La causa probable de esta situación se adjudica a la variación en carga orgánica volumétrica (COV) y se presenta a detalle en el apartado discusión y análisis.

#### **4.1.7 OPERACIÓN DEL BRAMD (BIOREACTOR ANAEROBIO DE MEMBRANA DINÁMICA)**

Dado que el análisis estadístico se efectuó de forma separada para cada una de las variables respuesta (es decir, un análisis considerando solamente el flux y otro para el resto de las variables respuesta) y no considerando en conjunto los cuatro parámetros, se propuso un índice de desempeño que permite evaluar el desempeño sopesando el compromiso entre calidad y productividad de permeado.

El índice propuesto fue llamado Índice de Desempeño de la Filtración Dinámica (IDFD) y es el cociente del flux y la suma de la turbiedad con la concentración de SST, como se muestra en la Ecuación 4.1:

$$\text{IDFD} = \frac{\text{Flux (L/m}^2\text{h)}}{\text{Turbiedad (UTN) + SST(mg/L)}}$$

*Ecuación 4.1 Índice de Desempeño de Filtración Dinámica*

El objetivo de este índice es ser una medida de la efectividad del proceso de filtración dinámica. Un valor alto es indicativo de un proceso de filtración productivo y de buena calidad dado que valores altos de flux y la obtención de bajos valores de turbiedad y SST son deseables, incrementando el valor del cociente. El parámetro DQO no fue incluido en esta relación dado que la DQO remanente en el permeado es predominantemente soluble y no se vio sustancialmente afectado durante la filtración dinámica, como se demostró anteriormente.

En la Tabla 4.3 se presentan las medias para cada uno de los tratamientos de las prueba 02PP y 04PP. Los valores corresponden a los presentados en la Figura 4.16 para polipropileno, el material que presentó un comportamiento más reproducible durante la experimentación. Con el IDFD se pueden identificar los mejores y peores procesos de filtración:

*Tabla 4.3 Promedio de los parámetros analizados para las corridas con polipropileno*

Tratamiento	Flux Promedio 02PP y 04PP	Turbiedad Promedio 02PP y 04PP	SST Promedio 02PP y 04PP	IDFD	Posición (1=mejor; 9=peor)
A1	61.81	16.43	15.54	1.93	3
A2	31.85	22.89	25.12	0.66	8
A3	26.61	24.81	18.44	0.62	9
B1	65.03	16.34	16.49	1.98	2
B2	75.57	18.45	19.32	2.00	1
B3	30.25	20.57	18.18	0.78	6
C1	47.67	21.58	20.90	1.12	5
C2	61.80	20.32	18.15	1.61	4
C3	35.58	22.63	24.92	0.75	7

Considerando el IDFD, el tratamiento que presentó las mejores condiciones de operación en las dos repeticiones realizadas fue el B2. En la Figura 4.17 se presenta su gráfica de desempeño y en la Figura 4.18 su eficiencia en la remoción de contaminantes:

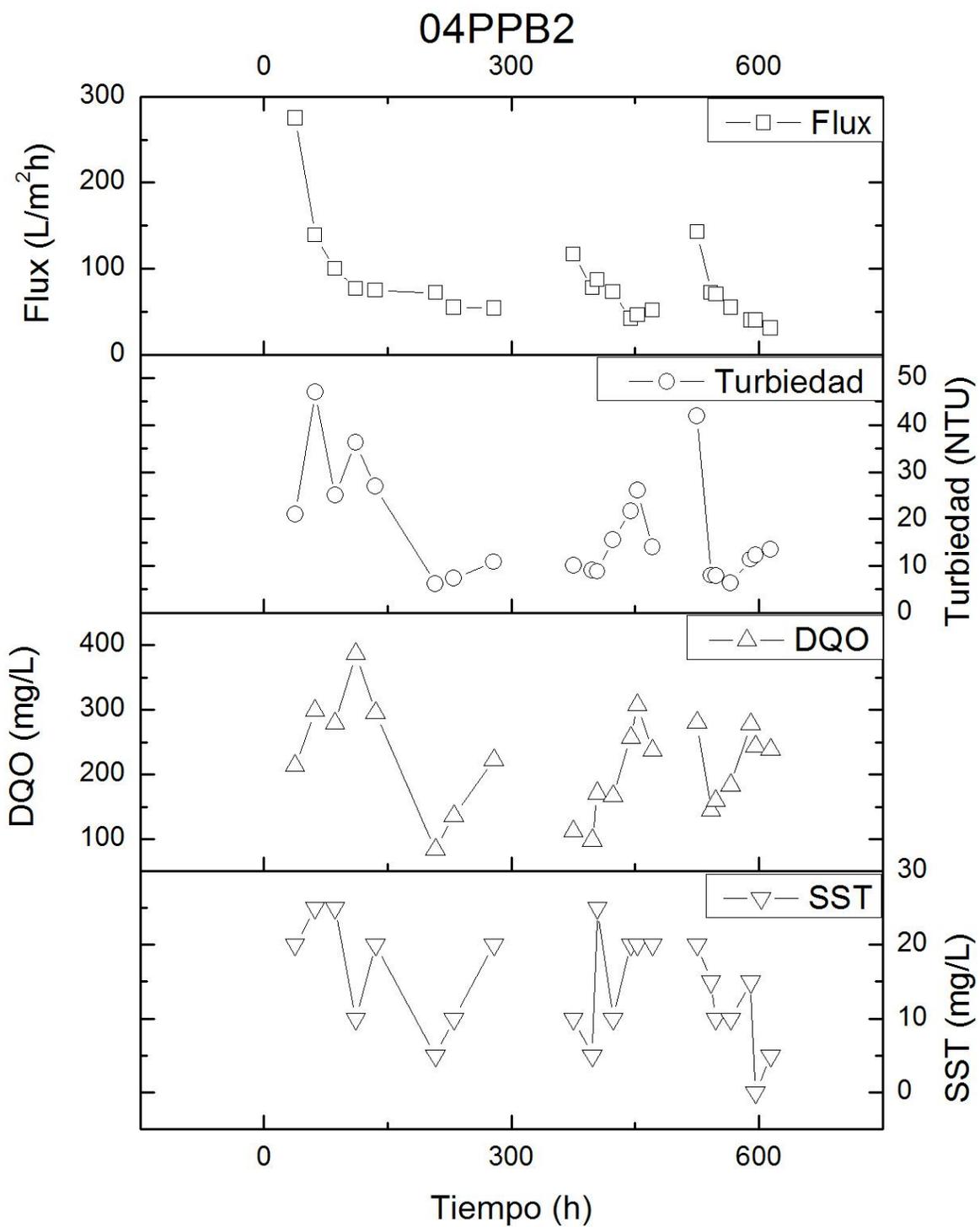


Figura 4.17 Series de tiempo del tratamiento 04PPB2

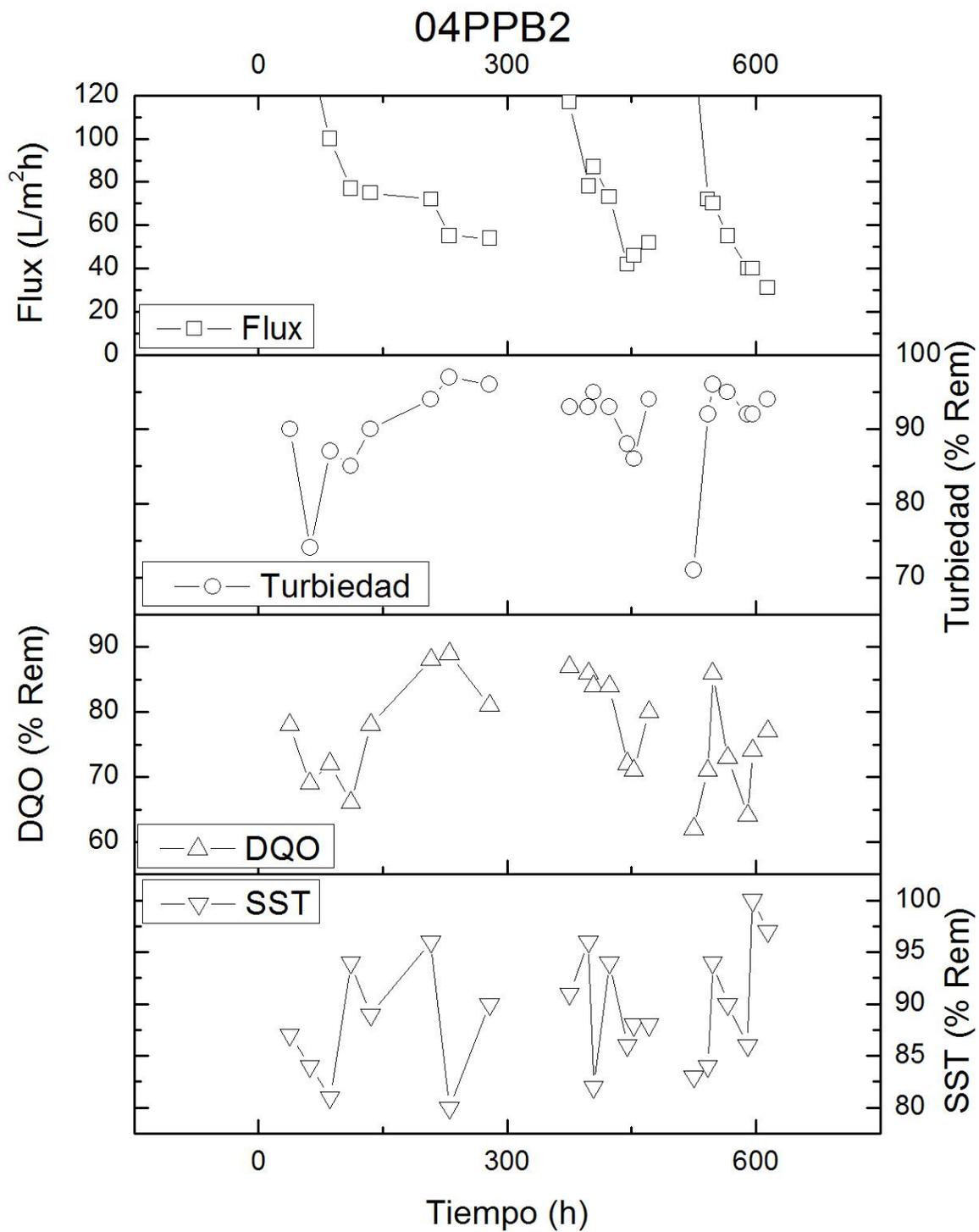


Figura 4.18 Series de tiempo de la remoción de tratamiento 04PPB2

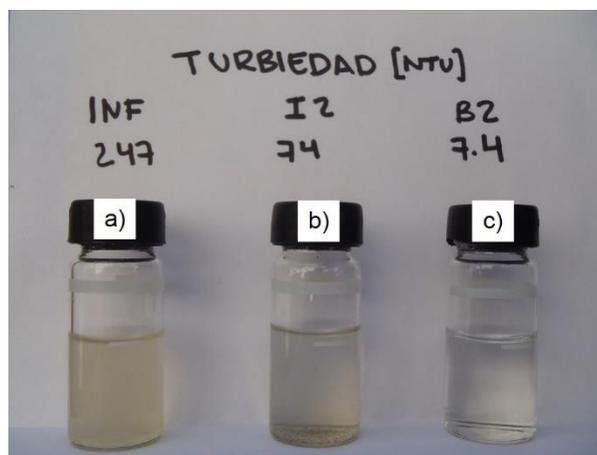
En la Tabla 4.4 se efectúa un análisis del bioreactor anaerobio de membrana dinámica. Los resultados presentados corresponden a valores promedio del experimento 4, el cual presentó los valores más sobresalientes:

*Tabla 4.4 Desempeño del BRAMD, considerando el tratamiento B2*

Parámetro	Influyente	Licor mezcla	B2	Remoción neta, %	Remoción debida al proceso biológico, %	Remoción debida al proceso de filtración, %
Turbiedad, UTN	185 ± 51.2	88 ± 36.8	18 ± 11.6	90 ± 6.6	52%	38%
DQO, mg/L	963 ± 212	838 ± 509	218 ± 78	77 ± 8.1	13%	64%
SST, mg/L	138 ± 35.4	170 ± 127	15 ± 7.4	89 ± 5.6	-24% <sup>1</sup>	113% <sup>2</sup>
Flux, L/m <sup>2</sup> h	N/A	N/A	82 ± 52.0	N/A	N/A	N/A

N/A= no aplica

Cabe resaltar que esta efectividad de tratamiento se logró en un TRH neto de 4.3 h horas. En la Figura 4.19 se hace una comparación visual de las muestras obtenidas. El valor de flux para este permeado correspondió a un valor de 55 L/m<sup>2</sup>h.



*Figura 4.19 Comparación de las muestras de a) influente del reactor; b) influente de la membrana B2; y c) permeado de la misma*

<sup>1</sup> Una remoción negativa implicó que el licor mezcla contenía una concentración de SSLM mayor a la concentración de sólidos del agua residual en el influente, debida a la biomasa anaerobia.

<sup>2</sup> Una remoción mayor al 100% implicó que la membrana recibió agua con mayor concentración de contaminantes con respecto al influente del sistema, no obstante fue capaz de revertir esta situación y en términos absolutos generó una remoción neta.

## **4.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

### **4.2.1 INSPECCIÓN MACRO Y MICROSCÓPICA**

En algunos tratamientos, la presencia de sólidos provenientes de la capa formada del lado del permeado ocasionó lecturas más altas de turbiedad, DQO y SST en el permeado, principalmente en los últimos dos ciclos de operación de cada corrida. Debido a su tamaño, los sólidos pudieron haber sido retirados del permeado con un cribado fino, no obstante esto no fue realizado dado que se hubiese alterado la muestra y el análisis estadístico subsecuente.

### **4.2.2 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DEL PERMEADO**

La obtención de un tamaño medio de partícula en el permeado B2 de 5.646  $\mu\text{m}$  (Figura 4.7) indica que el proceso de filtración fue llevado a cabo por la membrana dinámica, dado que el tamaño de poro de soporte correspondió a un valor de 50  $\mu\text{m}$ . Otro dato que respalda esta afirmación son los diámetros extremos de la distribución, con un 10% de las partículas con un diámetro menor a 3.018  $\mu\text{m}$  y un 90% con uno menor a 9.889  $\mu\text{m}$ , un intervalo relativamente más limitado a comparación de la DTP del influente y del licor mezcla, como se presentará más adelante. Intuitivamente, podría pensarse que el diámetro de poro de la MD formada durante esa prueba fue alrededor de 10  $\mu\text{m}$ .

### **4.2.3 COMPORTAMIENTOS DE LOS PARÁMETROS POR CICLO DE OPERACIÓN**

La drástica reducción de flux en el inicio de cada prueba, corresponde fielmente al comportamiento observado en sistemas de filtración con PTM constante. Con respecto a la reducción sostenida del flux en los ciclos “1” y “2” de operación, posiblemente este comportamiento sea el efecto de la acumulación de partículas en

el interior del soporte (taponamiento interno), el cual es difícil de remover con limpieza mecánica e incrementa la resistencia a la filtración (Ersahin, *et al.*, 2012).

A pesar de que al término de cada prueba existió posibilidad de realizar más ciclos de operación, aparentemente el flux de permeado es el parámetro que podría limitar la operación a largo plazo de la MD, al reducir el flux a un punto no viable en términos de productividad. No obstante, la literatura subraya la importancia de mantener un espesor de capa óptimo y de controlar la capa taponante para contar con una operación estable (Ersahin, *et al.*, 2014).

En cuanto a los parámetros de calidad (turbiedad, DQO y SST), la tendencia general de incremento en la remoción de contaminantes en el ciclo cero, también corresponde al proceso de formación de la MD: al inicio de la filtración gran parte de los contaminantes traspasaron el soporte, pero durante la formación de la capa taponante por acumulación de material, estos empezaron a ser retenidos en mayor medida y en consecuencia las lecturas de estos parámetros en el permeado se redujeron.

Así mismo, la relativa estabilidad en el comportamiento de estos parámetros en los ciclos subsecuentes, probablemente se debió a que con la limpieza manual se retiró una fracción considerable de la capa taponante pero se mantuvo sin alteración una base adherida al soporte, la capa gel, pudiendo ser ésta la responsable de la tendencia observada.

No obstante, en los ciclos “1” y “2”, para los tres parámetros de calidad (turbiedad, DQO y SST) se obtuvieron valores mayores a los observados al final del ciclo cero. Esto podría ser un indicio de que el método de limpieza debe ser mejorado y ser menos invasivo para conservar la estructura interna de la MD sin alteración significativa, y remover solo la parte superficial en contacto directo con el licor mezcla. La poca evidencia científica al respecto, mencionada en el inciso

2.5.3.2.3.5, indica que la eventual formación y conservación de una MD mínima y funcional es un campo de investigación aún por explorar.

Es importante mencionar que en los últimos dos ciclos de operación, la formación de la película del lado del permeado y su desprendimiento paulatino a través de las muestras de permeado, pudieron haber tenido una incidencia (a la alza) en las lecturas de los parámetros de calidad.

#### **4.2.4 TIEMPOS DE FILTRACIÓN**

Los tiempos promedio de formación de la MD de 476 horas (19.8 días) para el poliéster y de 308 horas (12.8 días) para el polipropileno, resultaron altos comparados con el obtenido por Zhang en 2010 de 7 días (Zhang, *et al.*, 2010) y comparables con el de (Ersahin, *et al.*, 2014) de entre 10 y 20 días. Así mismo los tiempos de filtración efectiva en cumplimiento con flux  $>25$  L/m<sup>2</sup>h y SST  $<5$  mg/L, fueron de 28.9 y 82.2 horas, respectivamente para cada material, generando una operación efectiva de corto plazo. Posiblemente la deposición adicional de material taponante una vez formada la MD, sea la causa de la disminución del flux y de la calidad.

Considerando tiempos de filtración efectiva, así como su reproducibilidad, las corridas con poliéster presentaron los tiempos de formación y filtración efectiva más convenientes, siendo el tratamiento B3, el que presentó un comportamiento más reproducible y mayores periodos de filtración efectiva, es decir, cumpliendo con los límites mencionados anteriormente.

Es importante mencionar que las dos formas de evaluar el desempeño (tiempos de filtración efectiva y el IDFD) pueden entrar en conflicto, dado que el IDFD no funciona con base en límites establecidos y se limita a obtener un valor del desempeño con base en todos los datos observados durante la corrida. En contraste, la evaluación por tiempos de filtración permite saber el comportamiento

de un tratamiento considerando límites establecidos, generando información sobre la variabilidad y la confiabilidad en la operación del tratamiento. En la Tabla 4.5 se muestra la comparación entre las dos clasificaciones:

*Tabla 4.5 Clasificación de los tratamientos de acuerdo al IDFD y a tiempos de filtración efectiva para poliéster*

	Posición considerando calidad y cantidad (IDFD)	Posición por tiempo de filtración efectiva (TFE)
A1	8	4
A2	9	8
A3	7	2
B1	5	8
B2	4	6
B3	6	1
C1	3	5
C2	1	7
C3	2	3

Dado que el objetivo general de la presente investigación fue la identificación de las mejores condiciones para la formación y operación de la MD, se favoreció la clasificación obtenida por el manejo de los datos sin discriminar, es decir, a través del uso del IDFD y no la clasificación por tiempo de filtración efectiva. No obstante, la clasificación por tiempos debe ser considerada en la operación a largo plazo y en un potencial escalamiento.

#### **4.2.5 ALTA PRESENCIA DE DQO SOLUBLE EN PERMEADOS**

La relativamente alta proporción de DQO soluble en el permeado  $73.4 \pm 14.7\%$   $n=46$ , encontrada en este estudio concuerda con la afirmación de que el proceso de tratamiento en la MD es mayoritariamente físico (Ozgun, *et al.*, 2013). Así mismo, en 2010, Zhang concluyó que la MD no puede retener adecuadamente la DQO

soluble y que se requiere un tratamiento aguas abajo para reducirla (Zhang, *et al.*, 2010).

De acuerdo a Smith, el metano solubilizado en el permeado podría representar del 40 al 50% del metano generado en condiciones psicrófilas en un BRAM (Smith, *et al.*, 2012) generando lecturas altas de DQO en el permeado.

Tomando en consideración este punto, durante la experimentación se efectuaron dos ensayos de DBO para conocer el potencial de biodegradabilidad del permeado y del influente. Los ensayos fueron realizados con equipos Oxitop IS 6, (WTW, Alemania) y los resultados se muestran en la Tabla 4.6:

*Tabla 4.6 Pruebas de DBO realizadas al influente y permeado B2*

Fecha	Muestra	DBO, mg/L	DQO, mg/L	DBO/DQO
20140329	B2	185	261	0.71
20140329	Influente	345	1093	0.32
20140331	B2	60	159	0.38
20140331	Influente	390	1147	0.34

Se observa que el influente presenta una limitada fracción biodegradable (DBO/DQO) alrededor de 0.33 (es decir, alrededor de una tercera parte de la DQO es materia biodegradable). No obstante y considerando las únicas dos pruebas realizadas, el permeado aparenta tener una amplia porción biodegradable, lo cual no sería consistente con un permeado rico en metano. La relativamente alta concentración de materia biodegradable sugiere un funcionamiento inapropiado del sistema biológico en la remoción de esta fracción.

#### **4.2.6 INFLUENCIA DE LOS FACTORES TAMAÑO DE PORO Y PTM Y SUS INTERACCIONES**

Varios autores sugieren que el flux no se ve afectado por la porosidad del soporte (Chang, *et al.*, 2002) o que tiene poca influencia en la filtración (Park, *et al.*, 2004). En contraste, Ersahin y colaboradores en 2012, así como Hwang y Cheng, en 2003,

concluyeron que el tamaño de poro sí interfiere tanto en la formación de la MD como en el flux de permeado (Ersahin, *et al.*, 2012) (Hwang & Cheng, 2003). En la presente investigación no fue posible determinar la significancia estadística de este factor debido a que el análisis generó resultados contradictorios. Este hecho coincide con los resultados ambiguos en la literatura y es claro que la posible influencia de este factor requiere un mayor nivel de investigación.

Con respecto a la PTM, Yu y Dong (2011) señalan que la MD se genera rápidamente en un soporte sometido a un tirante de agua crítico, el cual en caso de excederse conlleva al desarrollo de una capa taponante muy compacta y a un flux de permeado que decrece rápidamente, causando insuficiencia en la producción de agua (Yu & Dong, 2011). En el caso de la presente investigación, este valor pareció encontrarse a aproximadamente 1.28 m columna de agua, independientemente del tamaño de poro empleado.

La significancia de las interacciones entre los dos factores encontrada en la presente investigación, pudo ser la causa de la dificultad para formación de la MD durante la experimentación preliminar. Aparentemente la influencia de un solo factor no es suficiente para lograr la formación y operación de la MD y se requiere de la aportación sinérgica de al menos otro factor para lograr una operación estable.

#### **4.2.7 INFLUENCIA DE LA COV**

Como se mencionó en el apartado de resultados, se observaron valores similares de las variables respuesta en las corridas con polipropileno y mayor variabilidad (principalmente en flux) en las corridas con poliéster como material de soporte. No obstante, es importante subrayar que las corridas efectuadas con poliéster tuvieron una variación importante en el promedio de carga orgánica volumétrica (COV) del reactor (2.57 kg DQO/m<sup>3</sup>d en la primera prueba y 3.63 kg DQO/m<sup>3</sup>d en su repetición)

a diferencia de los valores de este parámetro en las corridas con polipropileno, los cuales fueron 3.13 y 2.97 kg DQO/m<sup>3</sup>d, respectivamente.

En su trabajo de investigación, Liu y colaboradores (2012) encontraron que un BRAM bajo una F/M más alta se vio sometido a un taponamiento más severo. En este trabajo es posible relacionar la COV con la F/M dado que estos parámetros fueron proporcionales: un incremento de la COV significó entonces un incremento en la F/M dado que la fracción de sustrato se modificaba en proporción a la DQO del influente, mientras que la cantidad de microorganismos (lodo anaerobio) se mantuvo constante.

Si bien la relación F/M no fue analizada en el presente trabajo, la COV del estudio de Liu corresponde a un valor de 6 kg DQO/m<sup>3</sup>d. Bajo las mismas condiciones, un reactor con una baja F/M con una carga orgánica de 1 kg DQO/m<sup>3</sup>d presentó menor pérdida de permeabilidad (Liu, *et al.*, 2012). Una tendencia similar se observó en la presente investigación.

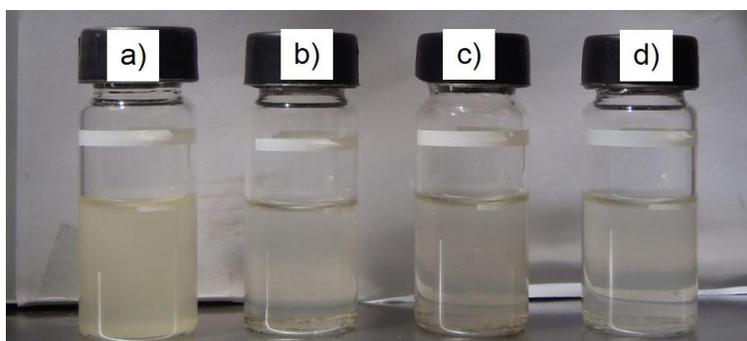
Con base en estos antecedentes, se atribuye la variabilidad de los resultados entre las repeticiones al cambio de carga orgánica volumétrica (COV) del reactor, obteniéndose mayor flux y mejor calidad de permeado con una COV alrededor de 3 kg DQO/m<sup>3</sup>d. Esto podría deberse a la mayor generación de SPE a valores de COV más altos, los cuales reducirían la permeabilidad del sistema, como ha sido documentado ampliamente en la literatura.

Los resultados sugieren que el sistema presentó mejor desempeño a COV bajas. Si bien las diferencias entre valores de COV pudieron haber sido las responsables de las discrepancias en los resultados en las repeticiones, esto permitió que el sistema

fuera probado bajo diferentes condiciones y evaluar su robustez, información preliminar valiosa para un potencial escalamiento.

#### 4.2.8 INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

El licor mezcla para cada uno de los tres niveles se compone de flóculos biológicos de distintas características en términos de concentración y DTP. Una imagen de la secuencia del tratamiento biológico en el reactor UASB se presenta en la Figura 4.20. Dada la importancia del tamaño de partícula mencionada en la literatura, se presenta un análisis profundo de este parámetro y su influencia en el comportamiento de la filtración dinámica en este experimento.



*Figura 4.20 Secuencia de tratamiento del proceso biológico: a) influente; b) nivel 3; c) nivel 2; y d) nivel 1 de operación dentro del reactor UASB*

En la Figura 4.21 se presentan los resultados de una prueba de distribución de tamaño de partícula, realizada durante el ciclo cero (etapa de formación) de la primera corrida con polipropileno:

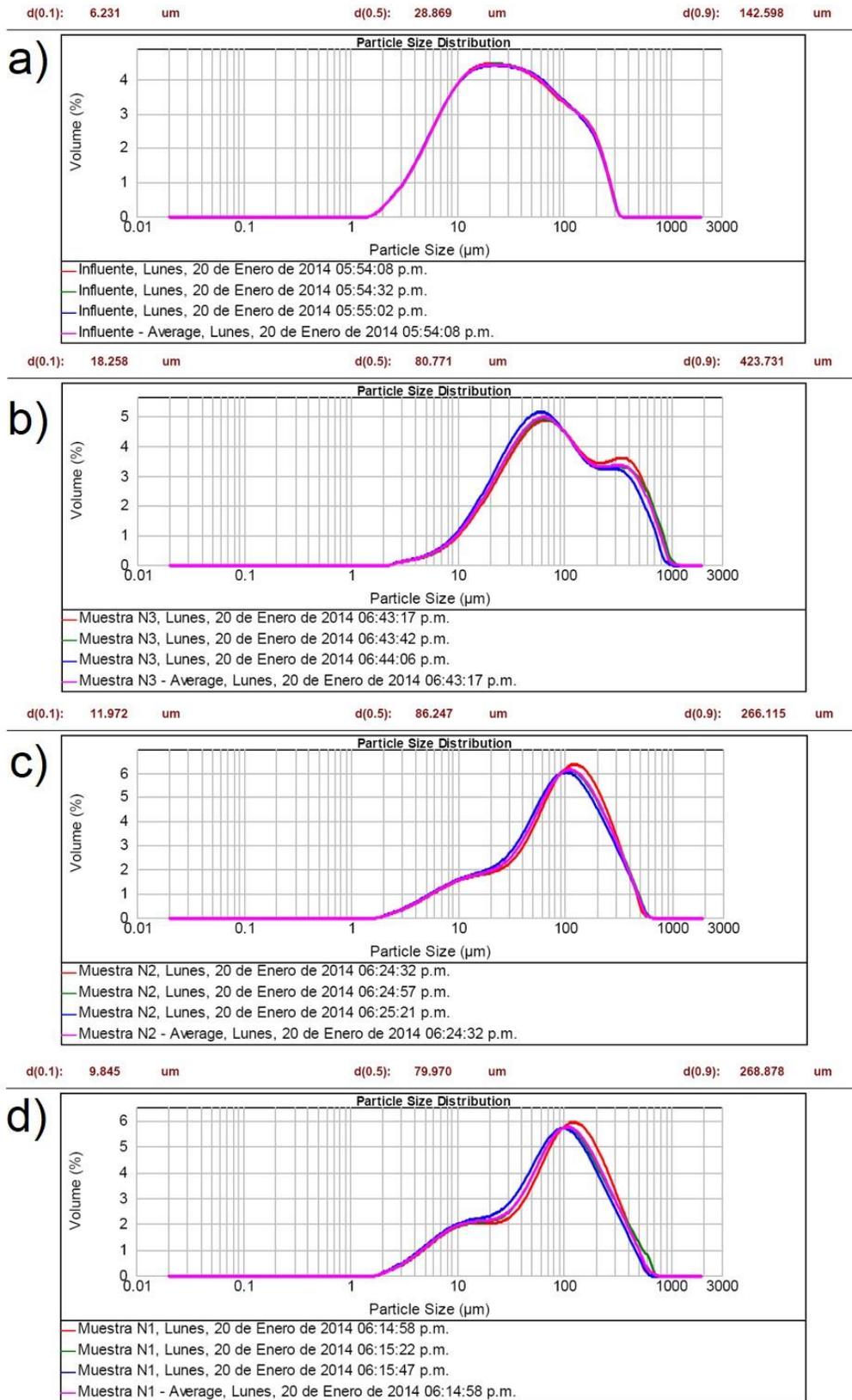


Figura 4.21 DTP de a) influente del reactor; b) nivel 3; c) nivel 2; y d) nivel 1 de operación

Se observa que el diámetro medio  $d(0.5)$  del licor mezcla (los influentes de las membranas) es similar entre los tres niveles, con valores de 80.77  $\mu\text{m}$  para el nivel 3 (el más profundo); 86.24  $\mu\text{m}$  para el nivel intermedio y 79.97  $\mu\text{m}$  para el nivel 1 (el más superficial).

No obstante, el  $d(0.5)$  es considerablemente menor en el influente del reactor (28.87  $\mu\text{m}$ ) lo que sugiere que el proceso biológico acondiciona el agua a ser filtrada, aglomerando partículas pequeñas y convirtiéndolas en partículas de mayor tamaño (80.77, 86.24 y 79.97 para los niveles “3”, “2” y “1”, respectivamente) para su posterior retención en la MD. También es importante mencionar que en 2010, Lin y colaboradores consideraron a los flóculos menores a 10  $\mu\text{m}$  como agregados formados por microorganismos, coloides, SPE, PMS y residuos celulares (Lin, *et al.*, 2010).

#### **4.2.9 COMPARACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS NUEVE CONDICIONES DE FILTRACIÓN**

La Figura 4.22 es una representación del desempeño promedio de las nueve membranas con polipropileno como material de soporte durante la prueba 02PP, considerando una carga orgánica volumétrica de 3.13 kg DQO/ $\text{m}^3\text{d}$  así como el diámetro medio resultante de la DTP para cada nivel de operación; el tamaño de poro del soporte; la PTM; y su IDFD. Dado que esta representación pretende considerar la escala, esta figura permite visualizar más fácilmente el desempeño de cada tratamiento en términos de flux (número de flechas) y calidad (color de las flechas) así como la posible estructura de la matriz sobre el soporte. Los valores de flux y calidad, corresponden a los promedios obtenidos para esta prueba:

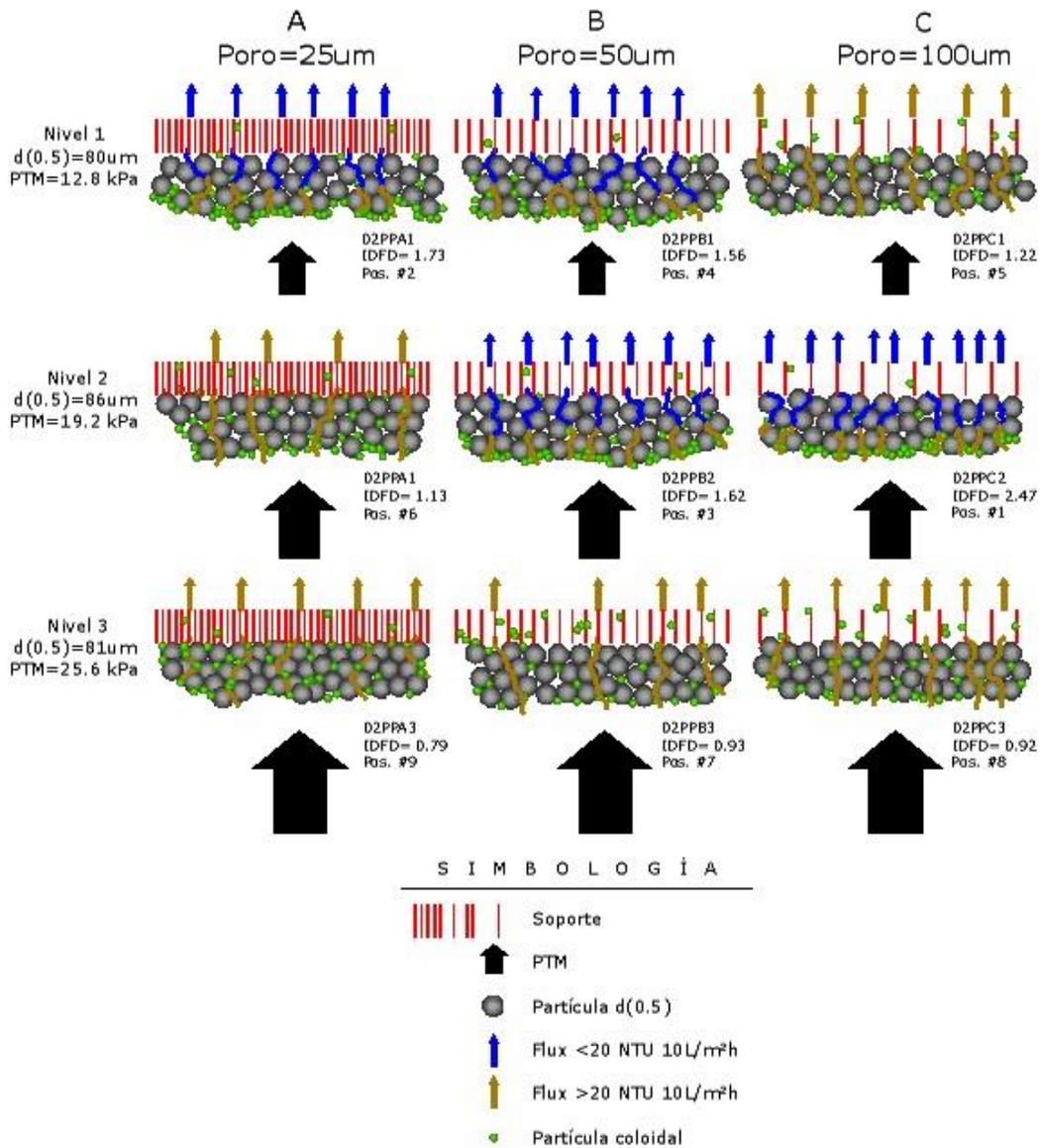


Figura 4.22 Comparación del funcionamiento de los nueve procesos de filtración dinámica en la prueba 02PP. Esta representación facilita el mostrar los resultados en términos de acercarse a identificar las mejores condiciones de operación con vista a hacer recomendaciones

Para sustentar la idea de este arreglo de partículas sobre el soporte, en 2013, Chu realizó un corte transversal de una MD aerobia creada con carbón activado en polvo y encontró que la capa formada presentó una estructura jerárquica, reduciéndose

en tamaño de partícula desde el soporte (mayor diámetro) hasta la zona de contacto con la solución a filtrar (menor diámetro). Incluso el valor de  $d(0.5)$  de la MD fue mayor que el del licor mezcla (Chu, *et al.*, 2013). Si bien los flóculos biológicos se coagulan y adsorben entre sí a diferencia del carbón activado en polvo, el comportamiento en la formación de la MD con este último podría brindar indicios del mecanismo de formación de la MD biológica en el presente trabajo.

La Figura 4.22 hace evidente que los valores mayores de flux estuvieron asociados con permeados de mejor calidad. La interacción determinada por el análisis estadístico (entre el tamaño de poro del soporte y la PTM) así como una probable interacción entre el tamaño medio de partícula del licor mezcla y una cantidad adecuada de SPE (relacionadas a la COV y actuando como material aglomerante) podría generar una matriz porosa que permita un ágil desplazamiento del líquido a través de los intersticios de la MD y del soporte.

Este desplazamiento del licor mezcla a través de la MD, podría ser también la causa de la generación de permeado de buena calidad debido al área de contacto generada por las múltiples cavidades en la MD la cual proporcionaría una superficie adecuada para la adsorción de partículas de menor tamaño (Figura 4.23a). Es importante mencionar que las MD remueven contaminantes por exclusión de tamaño (filtración) y adsorción (Ersahin, *et al.*, 2012). Como era de esperarse, la mejora en la calidad de permeado a lo largo de la operación, trajo como consecuencia una tendencia a la disminución del flux por el incremento en la resistencia a la filtración.

La Figura 4.23 ilustra las condiciones con el mejor y peor desempeño (inciso a y b, respectivamente). Al parecer, la interacción del inciso b (menor tamaño de poro y mayor PTM) favoreció el desarrollo de una MD que permitió el paso de coloides y pequeñas partículas (probable influencia de la PTM), con un flux bajo que resultó de una mayor resistencia a la filtración. Así mismo, dado que la MD podría presentar desprendimiento de materia particulada y coloidal, un valor menor de flux podría

incrementar la concentración de este material en el permeado, a diferencia de los tratamientos con mayor flux, los cuales presentarían permeados más diluidos y por ende más limpios.

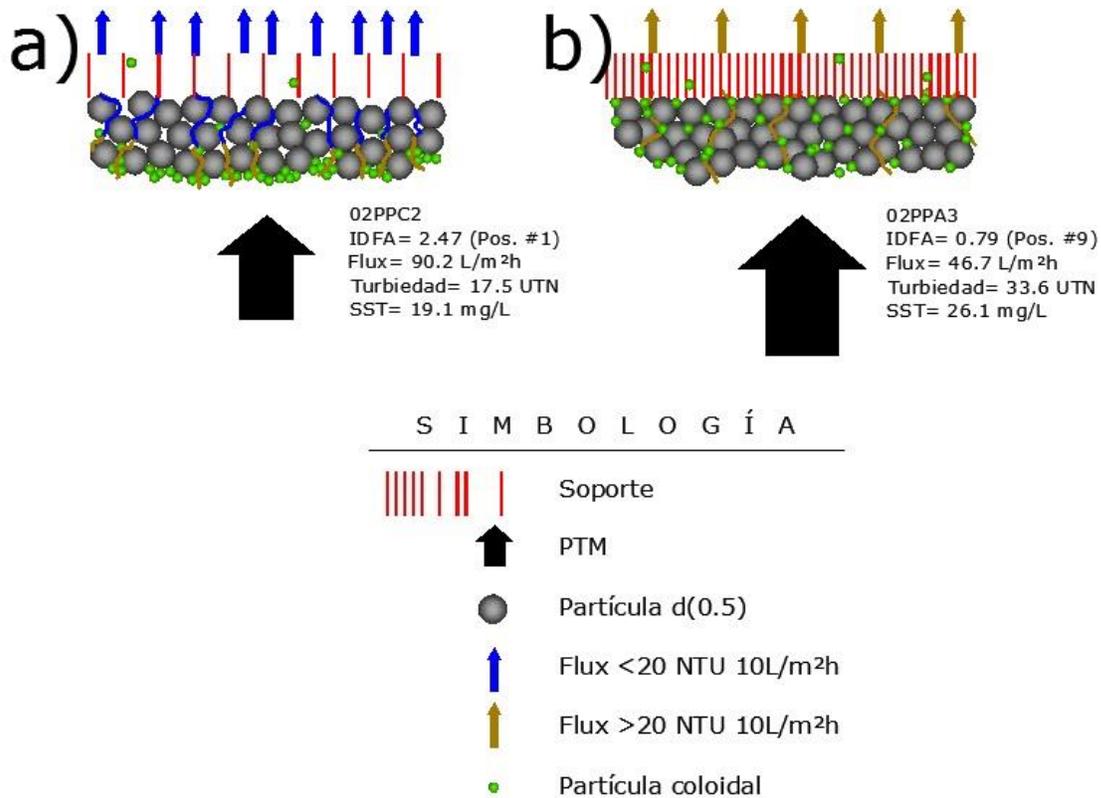


Figura 4.23 Comparación entre a) el mejor y b) peor tratamiento en la prueba 02PP

Esta idea, basada en argumentos especulativos, sugiere que el funcionamiento de la MD dependería de múltiples variables presentando efectos sinérgicos y quizá por ello la dificultad encontrada para lograr su formación y operación en experimentos previos.

#### 4.2.10 OPERACIÓN DEL BRAMD

Como fue presentado, en la Tabla 4.4 se observa que el proceso biológico y la filtración dinámica operaron como un complemento, distribuyéndose las proporciones en las remociones logradas. Por ejemplo, el proceso biológico fue el

principal contribuyente en la remoción de turbiedad y la filtración dinámica removió la mayor parte de la DQO particulada dejando prácticamente sin tratamiento la fracción soluble como se mencionó anteriormente.

Un caso similar se presentó con la remoción de SST, en el cual el proceso biológico transformó parte de la materia orgánica disuelta en biomasa, elevando la concentración de SST en el nivel “2” con respecto a los SST del influente lo que generó una reducción neta de turbiedad dado que parte de la fracción disuelta pudo haber sido adsorbida por los flóculos formados. No obstante la MD fue eficaz en la remoción de los sólidos aglomerados y/o aportados por el tratamiento biológico.

Para efectos de comparación, el flux sostenible aplicado en la mayoría de los estudios de BRAM es menor a 15 L/m<sup>2</sup>h y para los bioreactores aerobios de membrana (BRM) este valor se ubica en el intervalo de 25 a 140 L/m<sup>2</sup>h (Lin, *et al.*, 2013). Considerando el tratamiento B2, el flux promedio obtenido en el presente trabajo de  $82 \pm 52$  L/m<sup>2</sup>h es comparable incluso con algunos BRM y podría contribuir en la eliminación de la idea de la filtración dinámica anaerobia como un cuello de botella para la aplicación a escala industrial.

El valor alto de flux y la aceptable calidad observados en este tratamiento pudieron deberse, como se menciona anteriormente, a un efecto sinérgico entre el proceso biológico y la filtración dinámica: el proceso biológico funcionando como un pretratamiento para la MD, removiendo parte de la DQO particulada y al mismo tiempo reteniendo y aglomerando (mediante SPE) a la biomasa. Esto permitiría la generación de flóculos de tamaño adecuado para la formación y operación de la MD.

Así mismo, la operación a presión constante evitaría una compactación de la capa taponante, es decir se podrían mantener intersticios libres entre las partículas y una estructura muy permeable y en consecuencia con operación a flux alto. No obstante,

a causa de la deposición de SSLM, la capa se vuelve más espesa lo que reduce la permeabilidad y el flux.

#### 4.2.11 DISCUSIÓN DE LOS VALORES DE CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD, DQO Y SST

Con respecto a la baja correlación encontrada entre las variables respuesta (con valores de  $R^2 \approx 0.3$  en el permeado y  $R^2 \approx 0.1$  para el influente), se podría indicar que la composición del influente es atípica de un agua residual municipal común, debido al tipo de descargas generadas (en tiempo y en composición) en el campus, entre ellas las provenientes de los laboratorios. Esto se puede observar con los valores de DQO del influente, mismos que son altos con respecto a los SST, si se toma como base un agua residual municipal típica (Tabla 4.7):

*Tabla 4.7 Comparación entre el agua residual del estudio y un agua residual típica*

Parámetro, unidad	Agua residual del influente del reactor UASB	Agua residual cargada típica (Metcalf&Eddy, 2003)
SST, g/m <sup>3</sup>	274 ± 84 n=88	400
DQO, g/m <sup>3</sup>	991 ± 274 n=88	800
Turbiedad, UTN	193 ± 52.4 n=88	n/d

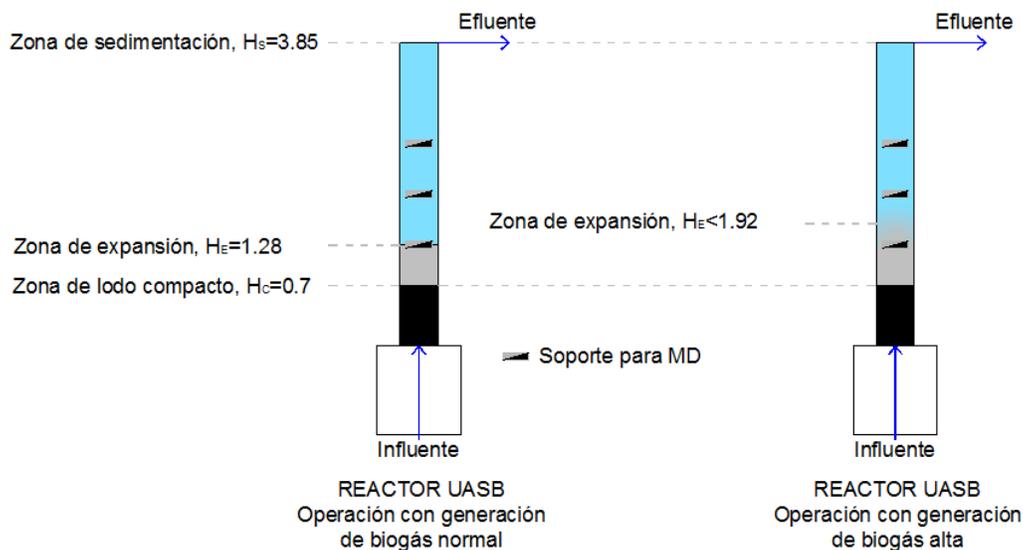
Es de resaltar el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.57$  entre turbiedad y DQO del influente, mismo que se reduce a 0.12 para la turbiedad y SST, lo que sugiere que la alta y cambiante fracción de DQO soluble posiblemente aportada por laboratorios pudo haber interferido en la baja correlación entre los parámetros, al contar con un influente bajo en turbiedad y con una concentración de DQO soluble promedio de 479 mg/L, n=19.

En concordancia con el presente trabajo, Zahid y El-Shafai (2011) encontraron una mejor correlación entre la DQO y los SST ( $R^2 = 0.91$ ) a comparación de la DQO y la turbiedad y de esta última y la turbiedad, señalando que la turbiedad del agua no solo es afectada por la concentración de sólidos suspendidos, sino también por su tamaño de partícula. En el caso de muestra con partículas coloidales, la turbiedad

puede llegar a exceder la concentración de sólidos suspendidos (Zahid & El-Shafai, 2011).

#### 4.2.12 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SSLM CON LA PTM

Dado que al interior de un reactor UASB la biomasa con mayor densidad se concentra en el fondo, pudo haber existido una interacción entre la presión generada por la columna de agua actuando sobre la membrana y la concentración de sólidos en cada uno de los niveles de operación. A pesar de haber elegido los sitios de ubicación de los soportes en la zona de sedimentación del reactor (justo encima de la cama de lodo) hubo ocasiones en las que el aumento en la generación de biogás (generada por un incremento en la COV) provocaba que el nivel de operación “3” quedara inmerso en la zona de expansión. Esto se respalda debido que ocasionalmente el licor mezcla en ese nivel presentó concentraciones de SST  $\geq 2000$  mg/L, DQO  $\geq 1500$  mg/L y turbiedad  $> 1000$  UTN. Esta situación se presenta esquemáticamente en la Figura 4.24:



*Figura 4.24 Representación del comportamiento de la zona de expansión del reactor en dos distintas generaciones de biogás. La altura del lecho de lodos se determinó mediante un nucleador que se sumergía dentro del reactor y permitía extraer un núcleo del mismo para su análisis*

Con el objeto de conocer si existió correlación entre el valor de SST de cada nivel de operación y el flux respectivo, se graficaron los datos de toda la etapa experimental, los cuales se presentan en la Figura 4.25:

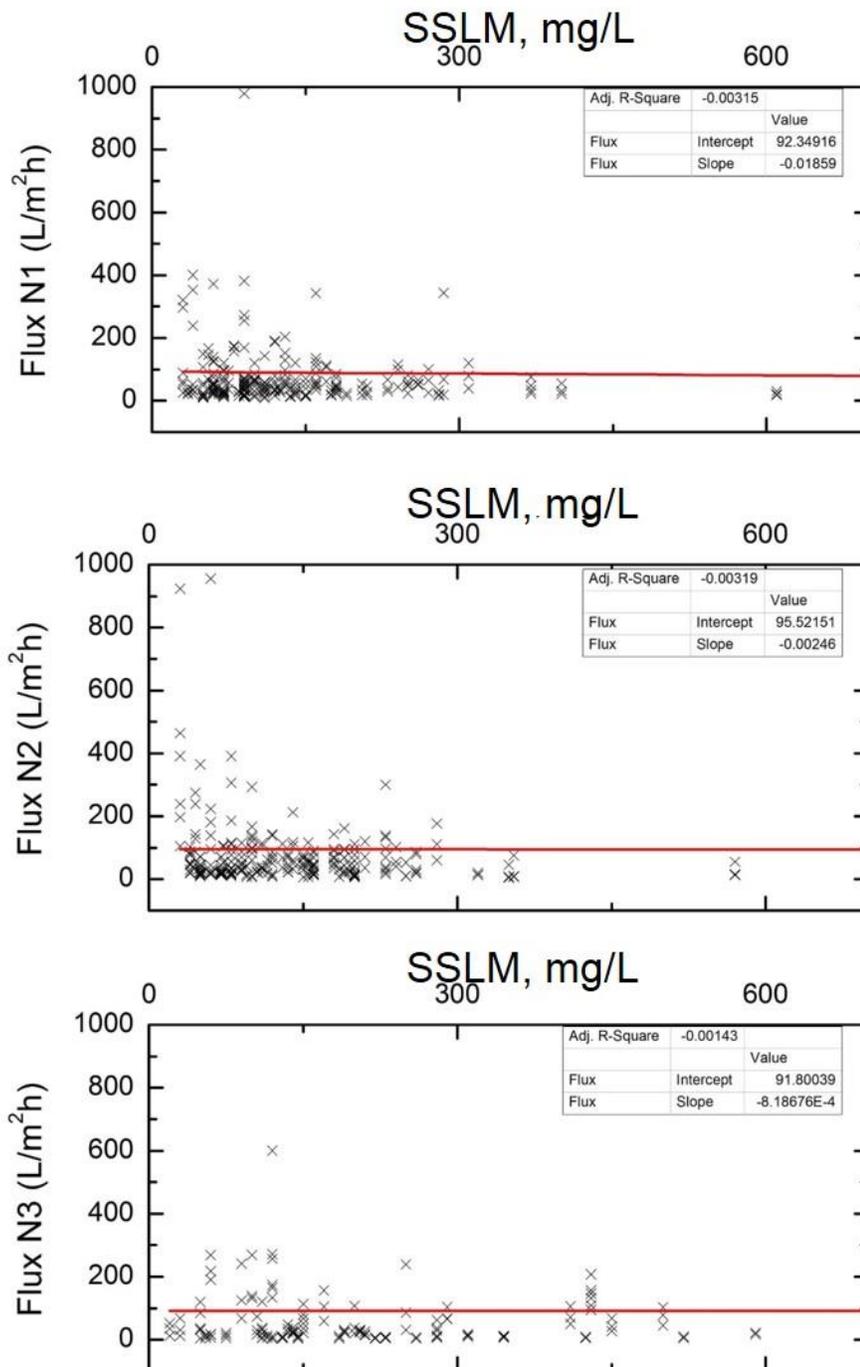


Figura 4.25 Correlación entre concentración de SSLM y flux por nivel de operación. Se muestran los datos de los cuatro experimentos

Es importante mencionar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre los SSLM y el flux de permeado fue prácticamente cero, como se observa en la Figura 4.25. Así mismo, en la Tabla 4.8 se pueden ver los promedios de operación de SSLM por nivel y a pesar de la amplia variabilidad en su concentración, no se observa un comportamiento con la misma tendencia en el flux:

*Tabla 4.8 Promedios de SSLM y flux por nivel de operación*

Nivel	SSLM promedio, mg/L	Flux promedio, L/m <sup>2</sup> h poro 25 µm	Flux promedio, L/m <sup>2</sup> h poro 50 µm	Flux promedio, L/m <sup>2</sup> h poro 100 µm
1	172	63	104	101
2	589	48	111	123
3	10,096	72	69	109

Es conveniente indicar que el valor de SSLM promedio del nivel “3” se vio afectado por la amplia variación de los valores con y sin lecho expandido, los cuales oscilaron desde 59,000 hasta 20 mg/L, respectivamente. Como referencia, la mediana de la concentración se ubicó en 520 mg/L. Así mismo, este análisis es una interpretación a partir de los datos obtenidos, dado que no se realizó un análisis estadístico per se para determinar la existencia de una correlación entre los SSLM y el flux de permeado. No obstante, se determinó que la PTM fue el factor responsable del comportamiento observado y no la variación en la concentración de SSLM, aunque esta observación se contrapone a la tendencia encontrada en la literatura.



## CAPÍTULO 5

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

1. En este estudio, las mejores condiciones de operación para la formación y operación de una membrana dinámica dentro de un reactor UASB fueron:

- Un soporte no tejido de polipropileno con tamaño nominal de poro de 50  $\mu\text{m}$
- Una PTM constante, generada por una columna de agua de 1.92 m

Estas condiciones correspondieron al tratamiento denominado “B2” durante la experimentación. Otros factores que pudieron haber tenido influencia en el desempeño son:

- Una carga orgánica volumétrica (COV) del reactor de  $\sim 3 \text{ kg DQO/m}^3\text{d}$
- Una distribución de tamaño de partícula (DTP) del licor mezcla con  $d(0.5)$  entre 1.5 y 2 veces el tamaño de poro del soporte es decir entre 75 y 100  $\mu\text{m}$ .

2. Considerando los tratamientos con un comportamiento más reproducible, los resultados del tratamiento polipropileno C2 (tamaño de poro de soporte 100  $\mu\text{m}$  y PTM de 19.2 kPa) correspondieron al menor tiempo de formación con un total de 370 h y con tiempo de filtración efectiva de 17 h por prueba. El tratamiento con mayor tiempo de filtración efectiva fue el poliéster B3 (tamaño de poro de soporte de 50  $\mu\text{m}$  y PTM de 25.6 kPa) con periodos de 53.5 h por prueba, con un tiempo de formación de MD promedio de 500 h.

3. Con base en el análisis estadístico, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) en favor de la alternativa ( $H_a$ ) y se determina que a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , la PTM actuando independientemente y la interacción entre ésta y el tamaño

de poro de soporte sí influyeron en el desempeño (en términos de flux y calidad de permeado) de una membrana dinámica anaerobia.

4. En el caso del poliéster, la variabilidad de las condiciones externas (carga orgánica volumétrica) probablemente influyó en la generación de resultados dispares entre las corridas. Además del tamaño de poro del soporte y la PTM, también podría existir influencia significativa del diámetro medio de partícula del licor mezcla en el desempeño de la filtración dinámica.
5. En la corrida y tratamiento con resultados más favorables (repetición con polipropileno, tamaño de poro 50  $\mu\text{m}$  y PTM=19.2 kPa) se obtuvo una remoción neta de  $90.0 \pm 6.6\%$  de turbiedad; de  $77 \pm 8.1\%$  de DQO y de  $89 \pm 5.6$  para SST a un flux promedio de  $82.0 \pm 52.0 \text{ L/m}^2\text{h}$ , con un error estándar de 11.2 unidades. Los valores en el permeado fueron  $18 \pm 11.6$  UTN para la turbiedad;  $218 \pm 78 \text{ mg/L}$  para DQO; y  $15 \pm 7.4 \text{ mg/L}$  para SST. Todos los valores consideran un tamaño de muestra  $n=22$  y una duración total cercana a las 4 semanas, con tres ciclos de operación y dos eventos de limpieza manual.
6. Con base a los resultados observados y a reserva de realizar más investigación, es poco probable lograr un desempeño competitivo con un bioreactor de membranas convencional mediante el tratamiento con MD anaerobias. El mayor flux observado y el potencial menor costo inicial, conlleva el compromiso de una menor calidad de permeado. No obstante y a reserva de realizar más investigación, la aplicación de las MD podría aplicarse cuando se requiera la obtención de una calidad de permeado superior a la generada por un proceso biológico anaerobio, inclusive con una filtración convencional posterior, probablemente a menores costos de inversión y operación.

7. El índice de desempeño de la filtración dinámica (IDFD) fue una manera práctica de evaluar las distintas corridas considerando simultáneamente la productividad y calidad del permeado con miras a emitir recomendaciones.
8. La filtración dinámica anaerobia es un proceso mayoritariamente físico y no biológico, dada la gran proporción de DQO soluble observada en el permeado.
9. La aplicación de MD requiere más investigación en la operación a largo plazo en términos de funcionamiento, confiabilidad y operatividad.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

1. Para reducir los valores de DQO en el permeado, los cuales son debidos principalmente a la fracción soluble, se debe mejorar la eficiencia del proceso biológico del reactor UASB.
2. Es recomendable el diseño y construcción de un módulo que permita el control del espesor de la MD (mediante limpieza) para evitar reducciones drásticas de flux sin empeorar la calidad del permeado, así como la limpieza del lado del permeado para extraer la biopelícula generada.

Así mismo, es ampliamente recomendable que el método de limpieza sea lo menos invasivo posible para evitar afectaciones a la estructura de la MD previamente formada y que la limpieza se enfoque únicamente en la zona de contacto con el licor mezcla.

3. En particular se recomienda lo siguiente:
  - Realizar pruebas con polipropileno como material de soporte, con tamaño de poro de 50  $\mu\text{m}$  a una PTM equivalente a un tirante de agua de 1.92 m con el objetivo de conocer el desempeño a largo plazo (>4 meses)

- Realizar un diseño experimental que permita identificar la frecuencia óptima de lavado para controlar el espesor de la MD
  - Estudiar la estructura de la MD para comprender su composición y generar información acerca de su comportamiento
  - Realizar un diseño experimental que permita conocer la influencia de los SSLM y su efecto en calidad y en el flux
4. Se sugiere la aplicación del IDFD para relacionar la producción y calidad de permeado y así evaluar el desempeño de las MD entre distintos tratamientos y estudios.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Alavi Moghaddam, M. R., Satoh, H. & Mino, T., 2002. Effect of important operational parameters on performance of coarse pore filtration activated sludge process. *Water Science Technology*, Issue 46 (9), pp. 229-236.
- Alibardi, L., Cossu, R., Saleem, M. & Spagni, A., 2014. Development and permeability of dynamic membrane for anaerobic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, Issue 161, pp. 236-244.
- Al-Malack, M. H. & Anderson, G. K., 1997. Cleaning techniques of dynamic membranes. *Separation Science Technology*, Volumen 12, pp. 25-33.
- APHA, AWWA, WEF, 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington D.C.: American Public Health Association.
- Asou, E., Suzuki, K., Fukunaga, K. & Miyasaka, K., 1998. *Characteristics of dynamic filtration system for treating real sewage*. Tokio, Japón, s.n.
- Bae, T.-H. & Tak, T.-M., 2005. Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor. *Journal of Membrane Science*, Issue 264, pp. 151-160.
- Bérubé, P. R., Hall, E. R. & Sutton, P. M., 2006. Parameters governing permeate flux in an anaerobic membrane bioreactor treating low-strength municipal wastewaters: a literature review. *Water Environment Research*, Volumen 78, pp. 887-896.
- Bowen, W. R., Yousef, H. N. S. & Calvo, J. I., 2001. Dynamic crossflow ultrafiltration of colloids: a deposition probability cake filtration approach. *Separation and Purification Technology*, Issue 24, pp. 297-308.
- Cerón Vivas, A., 2013. *Taponamiento de membranas de ultrafiltración sumergidas en la zona superior de un reactor UASB bajo diferentes condiciones hidrodinámicas*, México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Chang, I.-S., Le Clech, P., Jefferson, B. & Judd, S., 2002. Membrane Fouling in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, November, 128(11), pp. 1018-1029.
- Cheryan, M., 1998. *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*. Segunda edición ed. s.l.:CRC Press.
- Chu, H. Q., Cao, D., Jin, W. & Dong, B. Z., 2008. Characteristics of bio-diatomite dynamic membrane process for municipal wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, Issue 325, pp. 271-276.
- Chu, H., Zhang, Y., Zhou, X. & Dong, B., 2013. Bio-enhanced powder-activated carbon dynamic membrane reactor for municipal wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, Issue 433, pp. 126-134.

- Chu, H. y otros, 2014. Dynamic membrane bioreactor for wastewater treatment: Operation, critical flux, and dynamic membrane structure. *Journal of Membrane Science*, Issue 450, pp. 265-271.
- Chu, L. & Li, S., 2006. Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, Issue 51, pp. 173-179.
- Drews, A., 2010. Membrane fouling in membrane bioreactors -characterization, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*, Issue 363, pp. 1-28.
- Ersahin, M. E. y otros, 2012. A review on dynamic membrane filtration: Materials, applications and future perspectives. *Bioresource Technology*, Volumen 122, pp. 196-206.
- Ersahin, M. E., Ozgun, H. & van Lier, J. B., 2014. Applicability of dynamic membrane technology in anaerobic membrane bioreactors. *Water Research*, Issue 48, pp. 420-429.
- Fan, B. & Huang, X., 2002. Characteristics of a self-forming dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment. *Environmental Science Technology*, Issue 36, pp. 5245-5251.
- Gao, D. W. y otros, 2010. membrane fouling in an anaerobic membrane bioreactor: differences in relative abundance of bacterial species in the membrane foulant layer and in suspension. *Journal of Membrane Science*, Issue 364, pp. 331-338.
- Herrera-Robledo, M., 2007. *Bio-reactores anaerobios de membrana: efectividad de remoción de contaminantes y caracterización de los fenómenos de taponamiento*, México D.F.: s.n.
- Ho, J. & Sung, S., 2010. Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) treating synthetic municipal wastewater. *Bioresource technology*, Volumen 101, pp. 2191-2196.
- Hwang, K. Y. & Cheng, Y. H., 2003. The role of dynamic membrane in cross-flow microfiltration of macromolecules. *Separation Science Technology*, Issue 38(4), pp. 779-795.
- Jang, N. y otros, 2006. Characteristics of biofoulants in the membrane bioreactor. *Desalination*, Issue 200, pp. 201-202.
- Jeison, D., Díaz, I. & van Lier, J. B., 2008. Anaerobic membrane bioreactors: Are membranes really necessary?. *Electronic Journal of Biotechnology*, 11(4), pp. 1-7.
- Jeison, D., Díaz, I. & van Lier, J. B., 2008. Anaerobic membrane bioreactors: Are membranes really necessary?. *Electronic Journal of Biotechnology*, 11(4).
- Jeison, D., Plugge, C. M., Pereira, A. & van Lier, J. B., 2009. Effects of the acidogenic biomass on the performance of an anaerobic membrane bioreactor for wastewater treatment. *Bioresource Technology*, Issue 100, pp. 1951-1956.
- Jeison, D. & van Lier, J. B., 2007. Cake formation and consolidation: Main factors governing the applicable flux in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR)

treating acidified wastewaters. *Separation and Purification Technology*, Issue 56, pp. 71-78.

King County, 2012. *Wastewater Treatment King County*. [En línea]

Available at:

<http://www.kingcounty.gov/environment/wtd/Construction/North/Brightwater/Description/Treatment-Plant.aspx>

[Último acceso: 24 Noviembre 2013].

Kiso, Y. y otros, 2005. Coupling of sequencing batch reactor and mesh filtration: operational parameters and wastewater treatment performance. *Water Resources*, Volumen 39, pp. 4887-4898.

Kiso, Y. y otros, 2000. Wastewater treatment performance of a filtration bioreactor equipped with a mesh as a filter material. *Water Resources*, Issue 34 (17), pp. 4143-4150.

Koch Membrane Systems Inc., 2012. *An Overview of Membrane Technology and Theory*, Wilmington, MA: s.n.

Kraemer, J. T. y otros, 2012. A practitioner's perspective on the application and research needs of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, Volumen 122, pp. 2-10.

Le-Clech, P., Chen, V. & Fane, T. A. G., 2006. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, Issue 284, pp. 17-53.

Liang, S. y otros, 2013. Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self-forming dynamic membranes (SFDMs) in aerobic bioreactors: Formation time, filtration resistance, and fouling propensity. *Journal of Membrane Science*, Issue 436, pp. 186-194.

Liang, S. y otros, 2012. Determination of fouling-related critical flux in self-forming dynamic membrane bioreactors: Interference of membrane compressibility. *Journal of Membrane Science*, Issue 390-391, pp. 113-120.

Lin, H. J., Gao, W. J., Leung, K. T. & Liao, B. Q., 2011. Characteristics of different fractions of microbial flocs and their role in membrane fouling. *Water Science and Technology*, Issue 63, pp. 262-269.

Lin, H. J. y otros, 2010. Factors affecting sludge cake formation in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, Issue 361, pp. 126-134.

Lin, H. y otros, 2013. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination*, Issue 314, pp. 169-188.

Liu, Y., Liu, H., Cui, L. & Zhang, K., 2012. The ratio of food-to-microorganism (F/M) on membrane fouling of anaerobic membrane bioreactors treating low-strength wastewater. *Desalination*, Issue 297, pp. 97-109.

Loderer, C. y otros, 2013. Dynamic filtration - Ultrasonic cleaning in a continuous operated filtration process under submerged conditions. *Separation and Purification Technology*, Volumen 119, pp. 72-81.

- Ma, J. y otros, 2013. Microbial communities in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Comparison of bulk sludge and cake layer. *Process Biochemistry*, Issue 48, pp. 510-516.
- Marcinko, A. E. y otros, 1966. Hyperfiltration studies. 4. Salt rejection by dynamically formed hydrous oxide membranes. *Journal of the American Chemical Society*, Issue 88 (24), pp. 5744-5747.
- Meng, F. y otros, 2009. Recent Advances in Membrane Biorreactors (MBRs): Membrane Fouling and Membrane Materials. *Water Research*, Volumen 49, pp. 1489-1512.
- Metcalf&Eddy, 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4ta ed. New York: McGraw-Hill.
- Munir, A., 2006. *Dead End Membrane Filtration*, s.l.: s.n.
- Ozdemir, B., Saatci, A. & Yenigun, O., 2012. Evaluation of cake filtration biological reactors (CFBR) vs. membrane biological reactor (MBR) in pilot scale plant. *Desalination*, Issue 288, pp. 135-144.
- Ozgun, H. y otros, 2013. A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations. *Separation and Purification Technology*, Volumen 118, pp. 89-104.
- Park, M. S. y otros, 2004. Sludge thickening performance of mesh filtration process. *Water Science Technology*, Issue 50 (8), pp. 125-133.
- Petsev, D. N., Starov, V. M. & Ivanov, I. B., 1993. Concentrated dispersions of charged colloidal particles: sedimentation, ultrafiltration and diffusion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Issue 81, pp. 65-81.
- Pillay, V. L., Townsend, C. A. & Buckley, C. A., 1994. Improving the performance of anaerobic digesters at wastewater treatment works: the coupled cross-flow microfiltration/digester process. *Water Science Technology*, Issue 30 (12), pp. 329-337.
- Poostchi, A. A., Mehrnia, M. R., Rezvani, F. & Sarrafzadeh, M. H., 2012. Low-cost monofilament mesh filter used in membrane bioreactor process: filtration characteristics and resistance analysis. *Desalination*, Issue 286, pp. 429-435.
- Quarmby, J. & Forster, C. F., 1995. An Examination of the Structure of UASB Granules. *Water Resources*, 29(11), pp. 2449-2454.
- Ren, X. y otros, 2010. Novel membrane bioreactor (MBR) coupled with a nonwoven fabric filter for household wastewater treatment. *Water Research*, Issue 44, pp. 751-760.
- Seo, G. T. y otros, 2003. Non-woven fabric filter separation activated sludge reactor for domestic wastewater reclamation. *Water Science and Technology*, Issue 47 (1), pp. 133-138.
- Skouteris, G. y otros, 2012. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, Volumen 198-199, pp. 138-148.

- Smith, A. L. y otros, 2012. Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: A critical review. *Bioresource Technology*, Volumen 122, pp. 149-159.
- Stuckey, D. C., 2012. Recent developments in anaerobic membrane reactors. *Bioresource Technology*, Volumen 122, pp. 137-148.
- Wang, Y.-K., Sheng, G.-P., Li, W.-W. & Yu, H.-Q., 2012. A pilot investigation into membrane bioreactor using mesh filter for treating low-strength municipal wastewater. *Bioresource Technology*, Issue 122, pp. 17-21.
- Water Environment Federation, 2012. *WEF Manual of Practice No. 36 Membrane Bioreactors*. 1st ed. Alexandria, VA: WEF Press.
- Wen, C., Huang, X. & Qian, Y., 1999. Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration. *Process Biochemistry*, Issue 35, pp. 335-340.
- Wu, B. & Zhou, W., 2010. Investigation of soluble microbial products in anaerobic wastewater treatment effluents. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Issue 85, pp. 1597-1603.
- Xie, Z. y otros, 2014. An anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for landfill leachate treatment: Performance and microbial community identification. *Bioresource Technology*, Issue 161, pp. 29-39.
- Yin, L., Haining, L., Li, C. & Zhang, K., 2012. The ratio of food-to microorganisms (F/M) in membrane fouling of anaerobic membrane bioreactors treating low-strength wastewater. *Desalination*, Issue 297, pp. 97-109.
- Yu, Z. & Dong, B., 2011. *Recent Advances in Dynamic Membrane Bio-reactor*. Xi'an, IEEE.
- Zahid, W. M. & El-Shafai, S. A., 2011. Use of cloth-media filter for membrane bioreactor treating municipal wastewater. *Bioresource Technology*, Issue 102, pp. 2193-2198.
- Zhang, X. y otros, 2010. Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, Volumen 165, pp. 175-183.
- Zhang, X. y otros, 2011. Membrane fouling in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Characteristics of membrane foulants and bulk sludge. *Process Biochemistry*, Volumen 46, pp. 1538-1544.
- Zhi-Guo, M., Feng-lin, Y. & Xing-wen, Z., 2005. MBR Focus: do non-wovens offer a cheaper option?. *Filtration Separation*, Issue 42 (5), pp. 28-30.



## ANEXO A

Tablas de los datos obtenidos durante la experimentación.  
En disco compacto adjunto.































04PPB1											04PPB2													
Tiempo h	Flux L/m <sup>2</sup> h	F.E?	Turbiedad NTU	F.E?	DQO mg/L	F.E?	SST mg/L	F.E?	Impactos	FE	Tiempo h	Flux L/m <sup>2</sup> h	F.E?	Turbiedad NTU	F.E?	DQO mg/L	F.E?	SST mg/L	F.E?	Impactos	FE			
38	147	1	17.6	0	186	1	15	1	3	0	38	275	1	21	0	213	1	20	1	3	0			
62	68	1	29.4	0	329	1	20	1	3	0	62	139	1	47	0	299	1	25	0	2	0			
86	68	1	21.3	0	259	1	6.67	1	3	0	86	100	1	25.1	0	279	1	25	0	2	0			
111	34	1	30.8	0	341	1	20	1	3	0	111	77	1	36.3	0	387	0	10	1	2	0			
135	30	1	23.8	0	280	1	20	1	3	0	135	75	1	26.9	0	295	1	20	1	3	0			
208	37	1	10.7	0	151	1	10	1	3	0	208	72	1	6.18	1	84	1	5	1	4	47.5			
230	34	1	10.1	0	161	1	5	1	3	0	230	55	1	7.38	1	136	1	10	1	4	35.5			
279	42	1	15	0	233	1	20	1	3	0	279	54	1	10.9	0	222	1	20	1	3	0			
360	Limpieza										360	Limpieza												
375	107	1	12.4	0	146	1	5	1	3	0	375	117	1	10.1	0	112	1	10	1	3	0			
398	96	1	7.18	1	129	1	0	1	4	14.5	398	78	1	9.04	1	98	1	5	1	4	14.5			
404	82	1	9.17	1	153	1	20	1	4	12.5	404	87	1	8.84	1	171	1	25	0	3	0			
423	57	1	5.38	1	107	1	0	1	4	20.5	423	73	1	15.6	0	166	1	10	1	3	0			
445	37	1	9.87	1	217	1	5	1	4	15	445	42	1	21.7	0	257	1	20	1	3	0			
453	38	1	12.8	0	257	1	15	1	3	0	453	46	1	26.1	0	307	1	20	1	3	0			
471	33	1	9.18	1	238	1	20.5	1	4	23	471	52	1	14	0	237	1	20	1	3	0			
499	Limpieza										499	Limpieza												
525	373	1	37.7	0	266	1	20	1	3	0	525	143	1	42	0	280	1	20	1	3	0			
542	51	1	7.33	1	152	1	13.3	1	4	11.5	542	72	1	7.98	1	144	1	15	1	4	11.5			
548	48	1	7.62	1	158	1	10	1	4	12	548	70	1	7.85	1	159	1	10	1	4	12			
566	37	1	5.26	1	193	1	0	1	4	21	566	55	1	6.46	1	183	1	10	1	4	21			
590	28	1	6.94	1	236	1	5	1	4	15	590	40	1	11.4	0	278	1	15	1	3	0			
596	29	1	8.3	1	267	1	10	1	4	12	596	40	1	12.4	0	243	1	0	1	3	0			
614	28	1	8.97	1	273	1	15	1	4	9	614	31	1	13.5	0	238	1	5	1	3	0			
										166.0												Filtración efectiva, h		
										398													Tiempo de formación,	
										614														Duración total, h

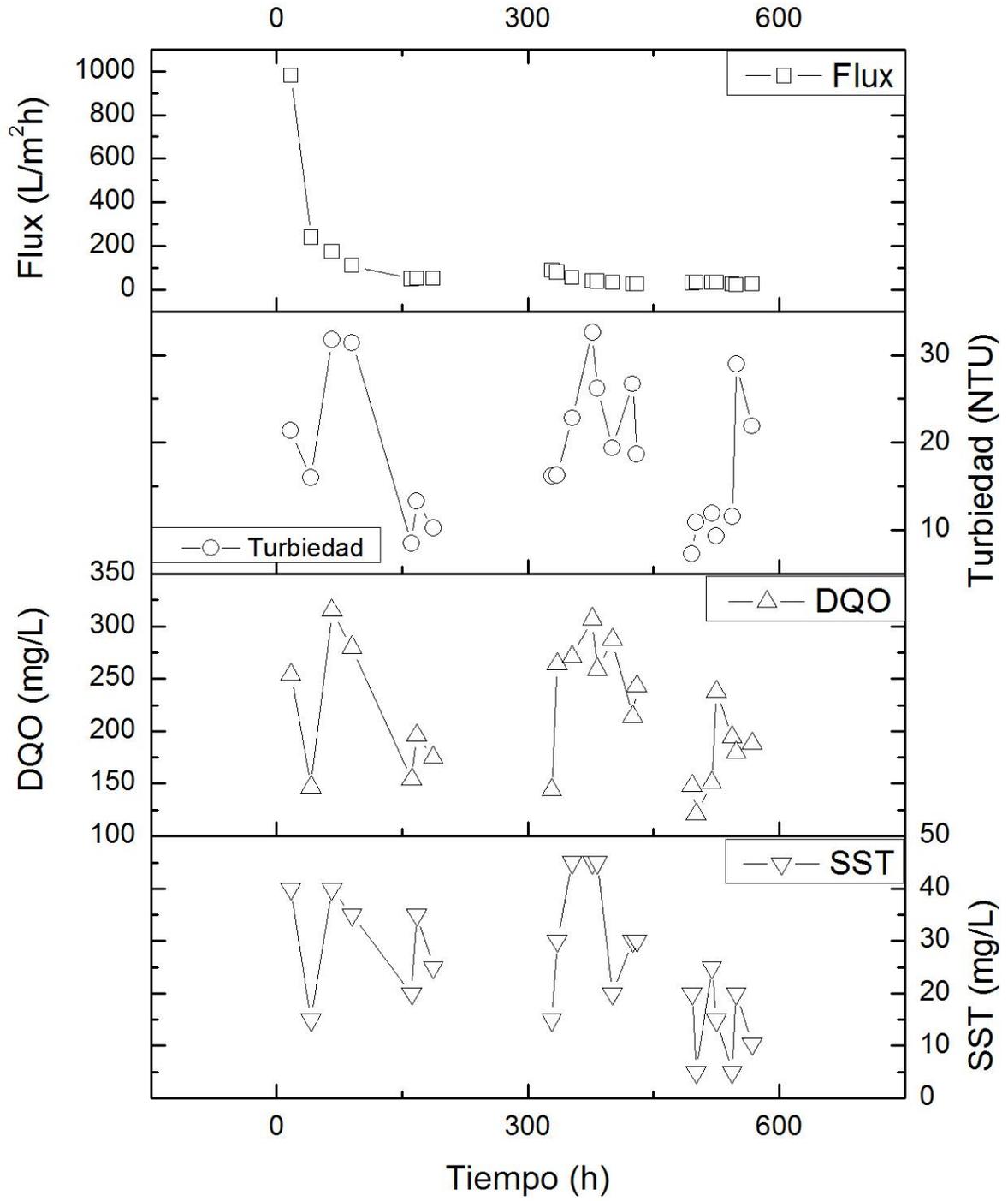




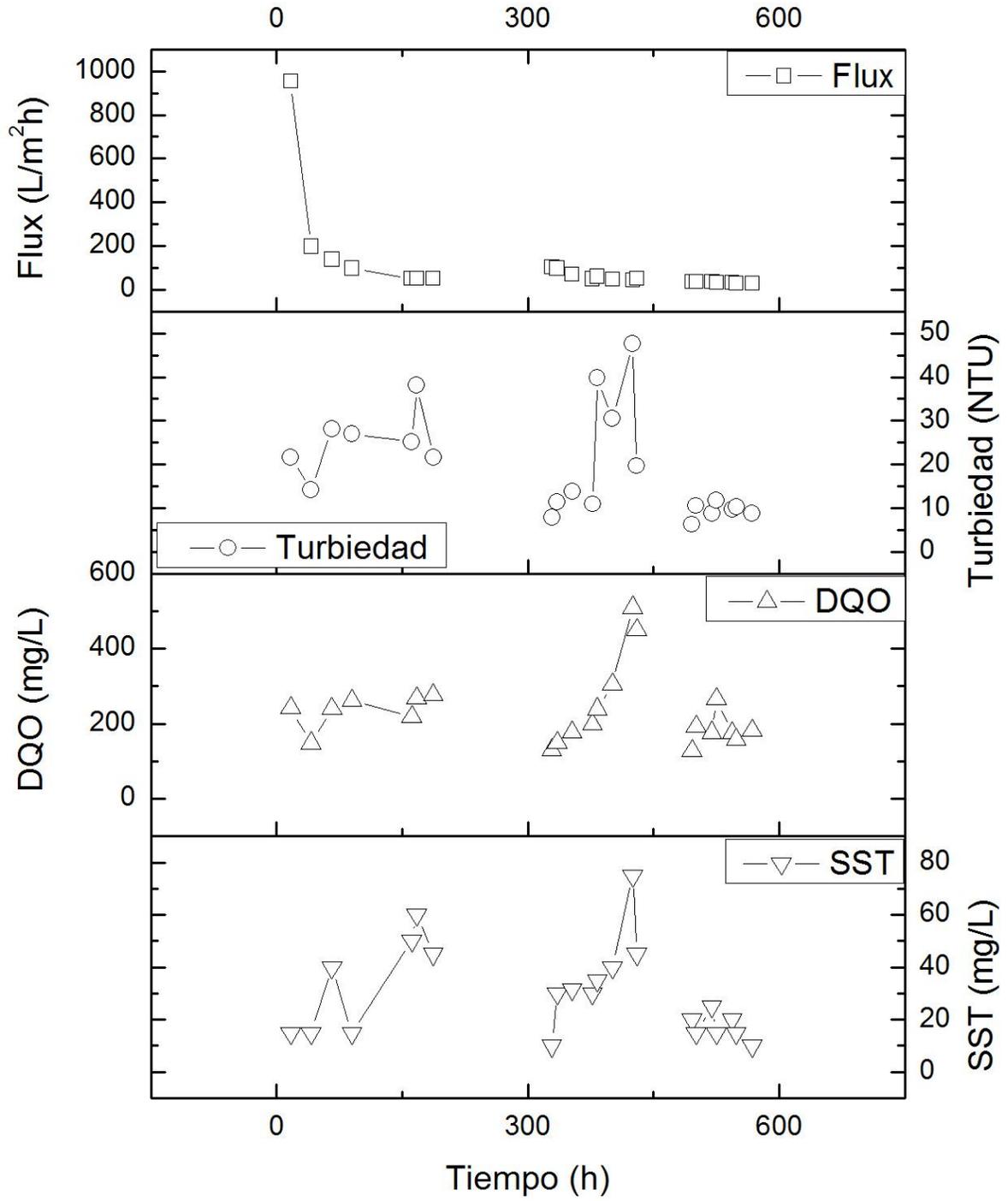
## ANEXO B

Series de tiempo de los datos obtenidos durante la experimentación  
En disco compacto adjunto.

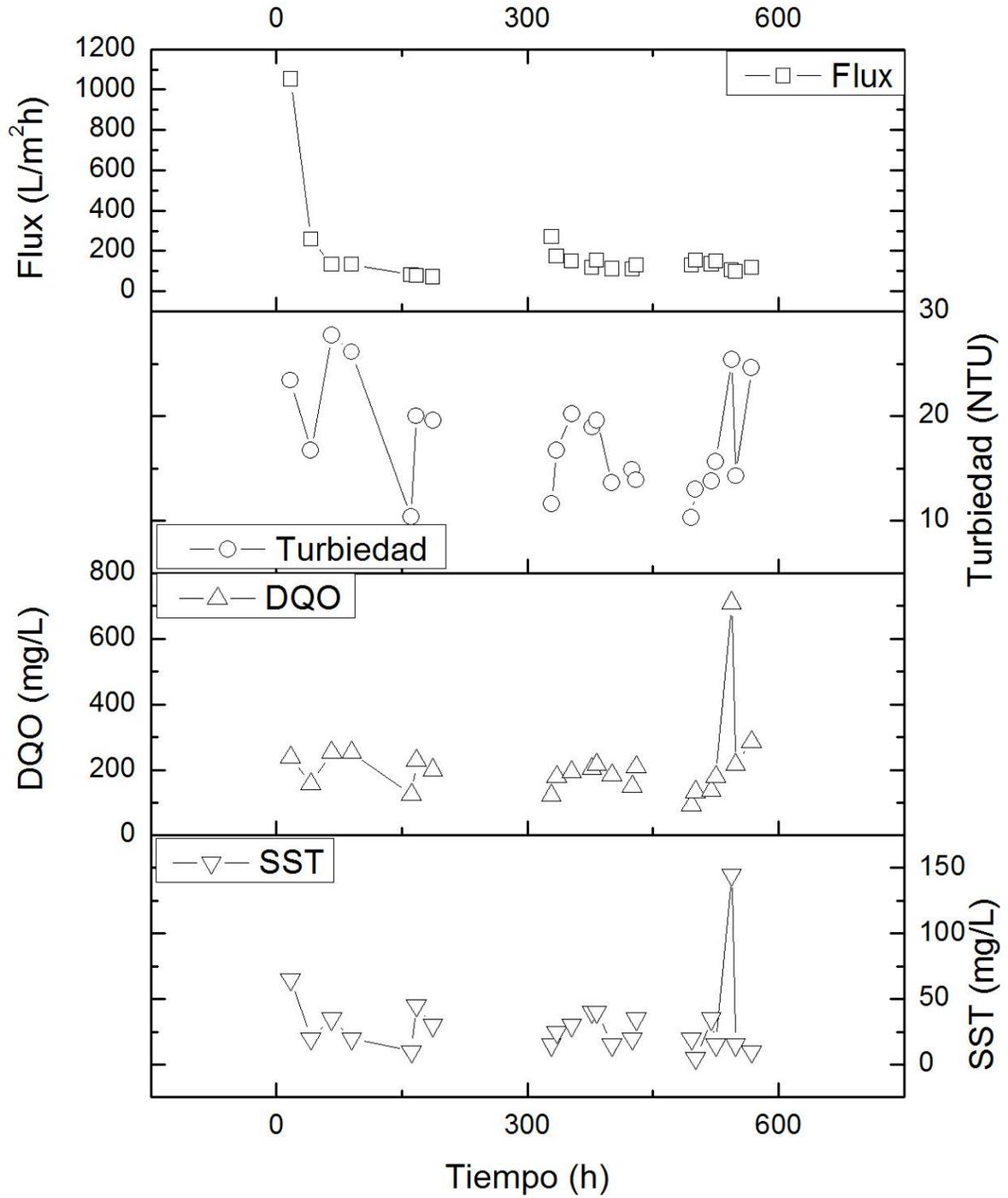
# 01PEA1



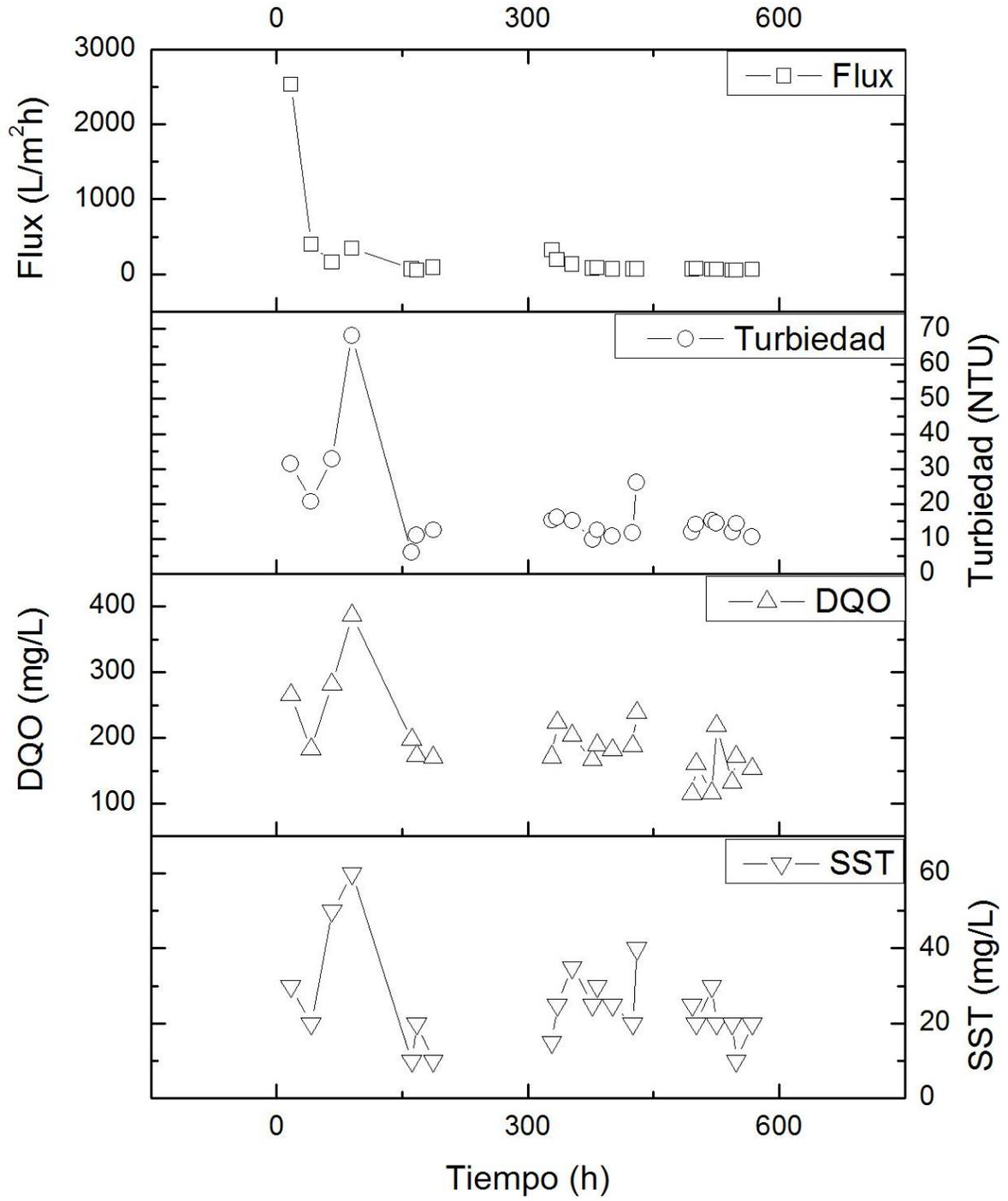
# 01PEA2



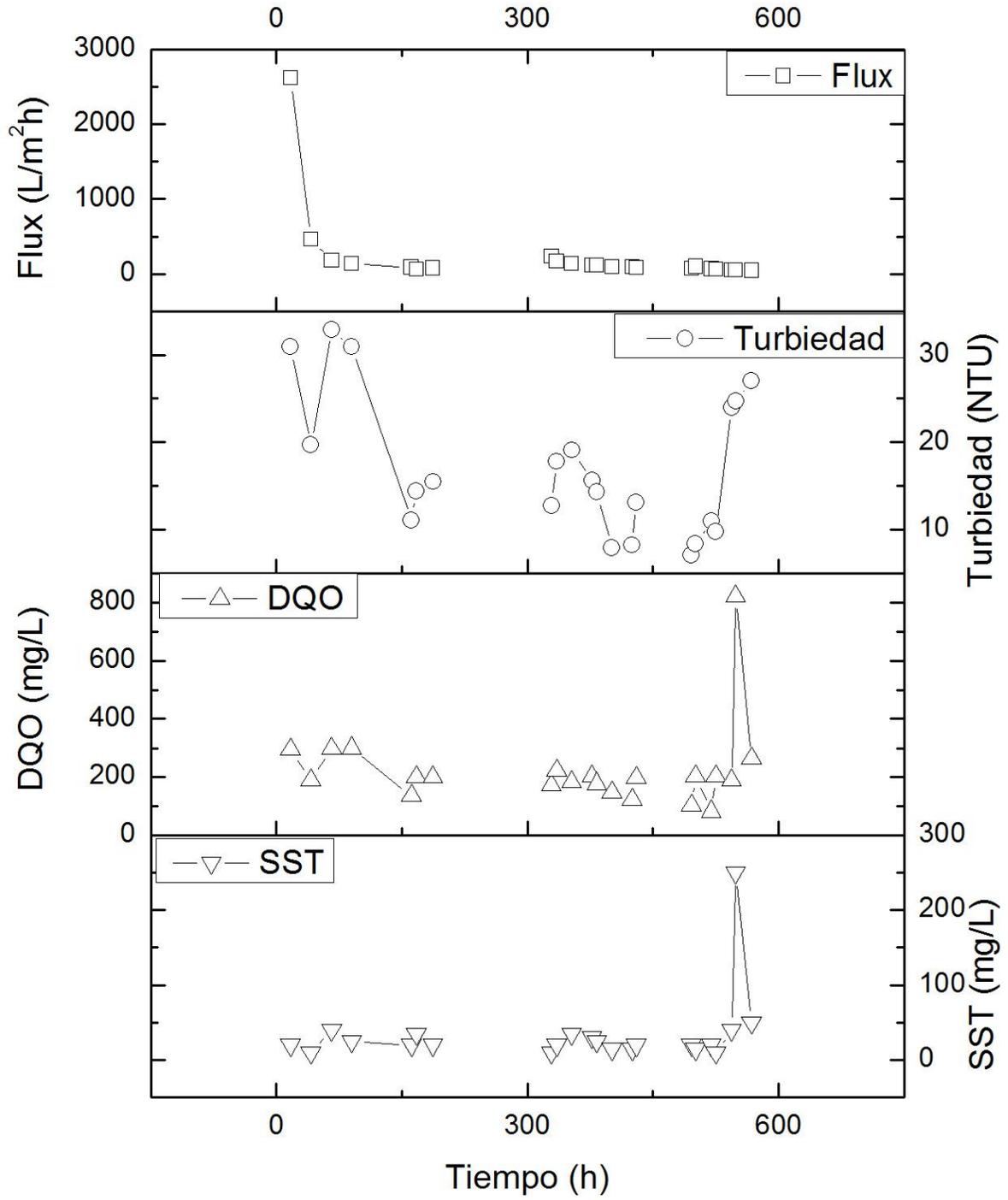
# 01PEA3



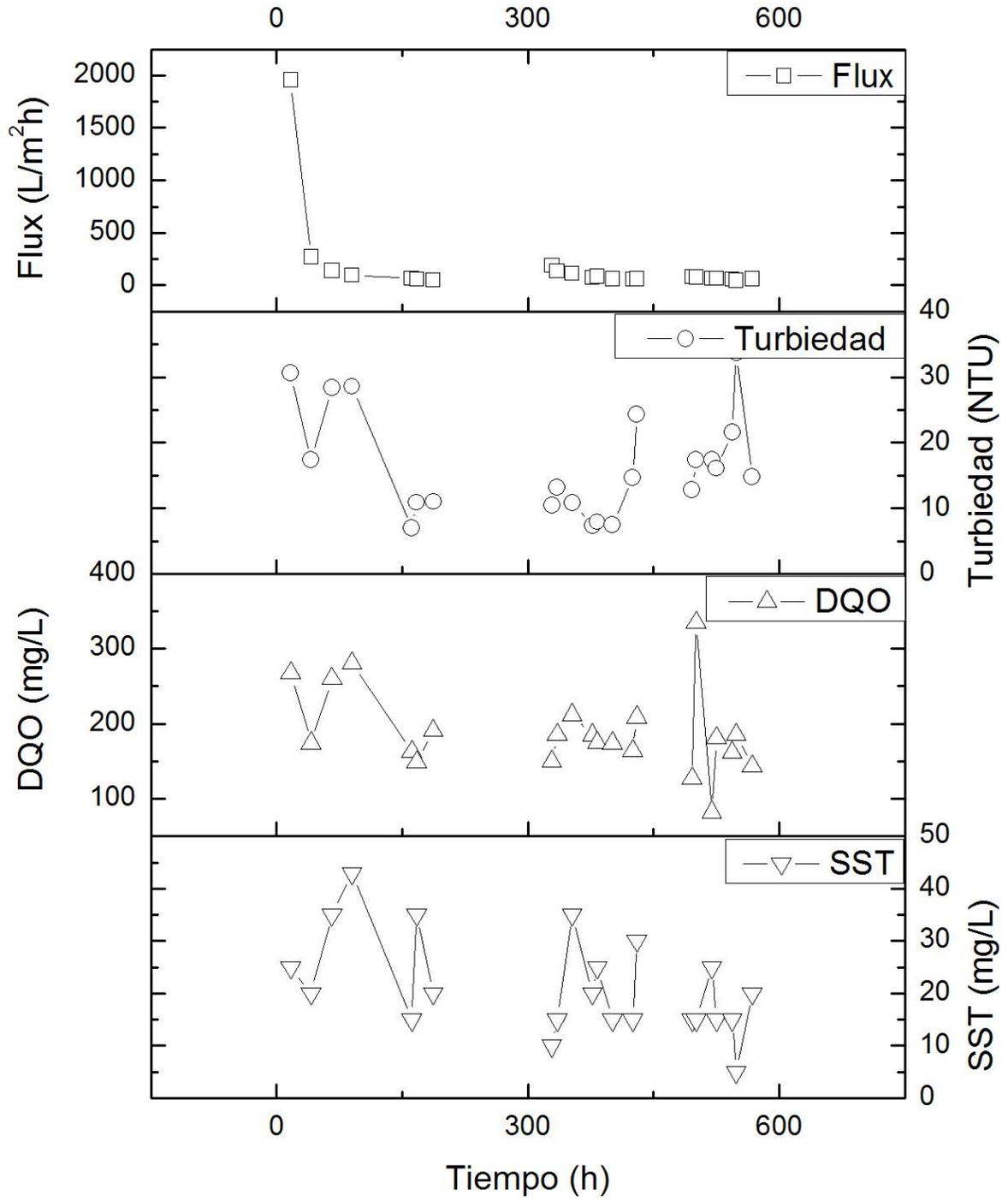
# 01PEB1



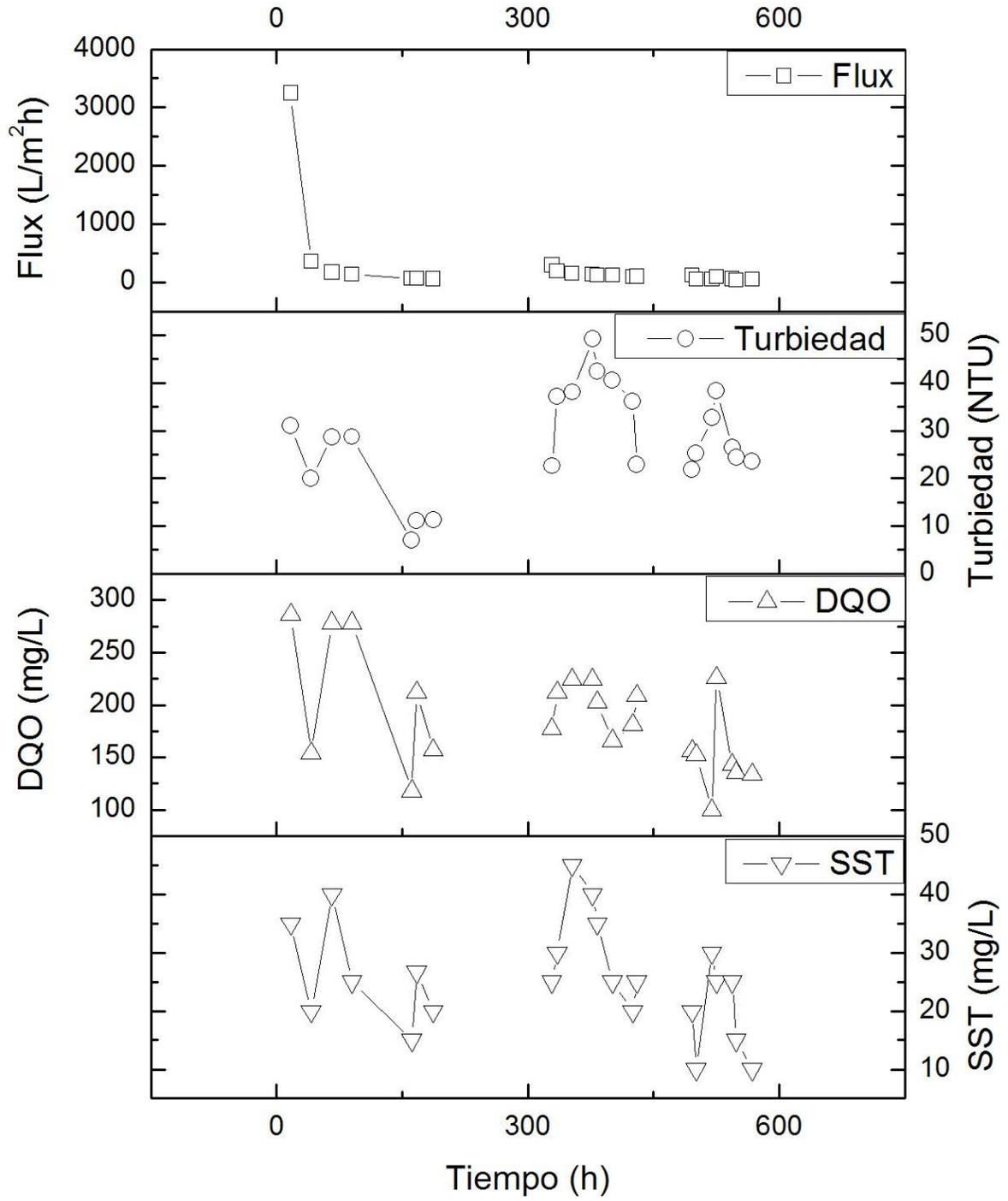
# 01PEB2



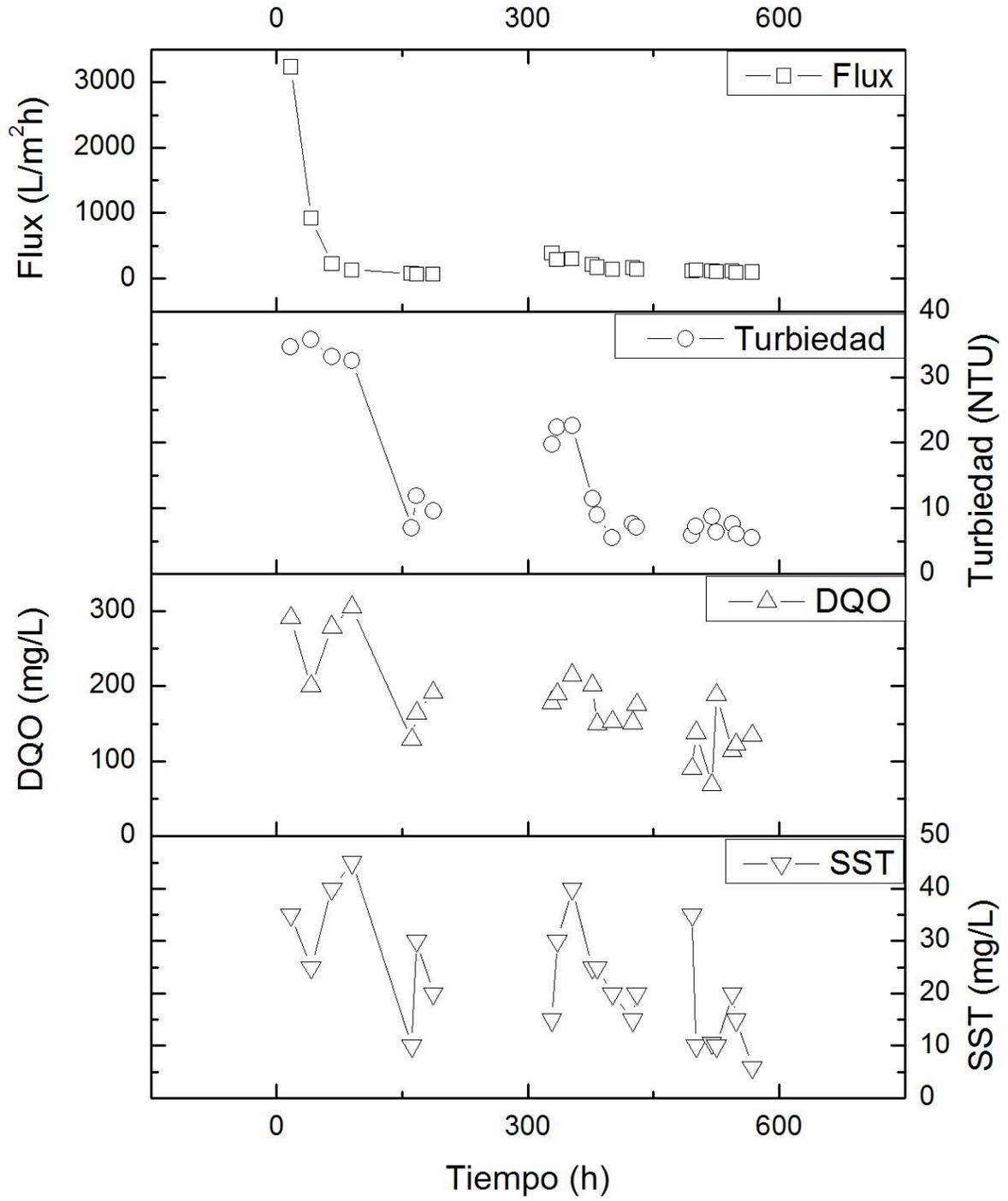
# 01PEB3



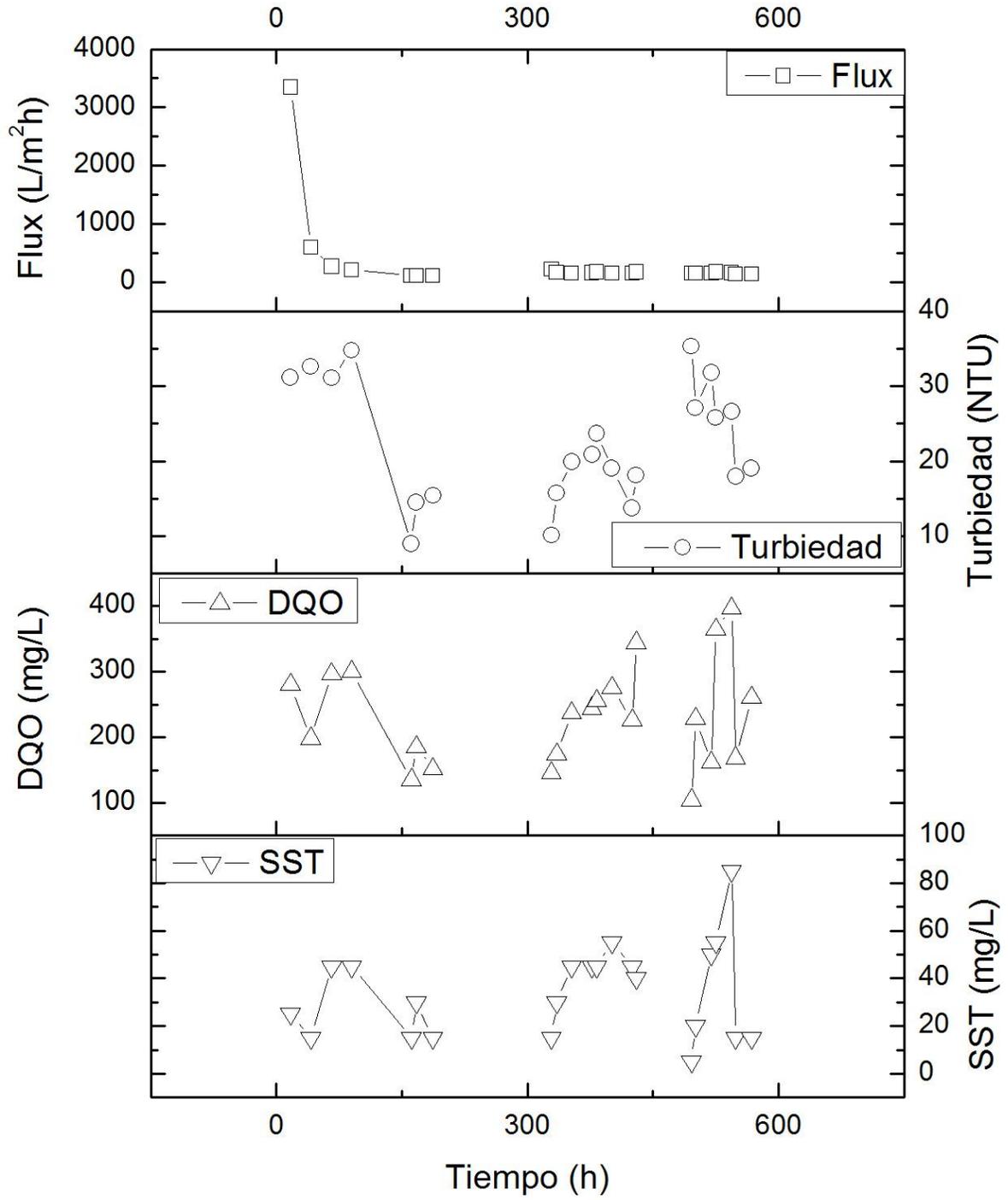
# 01PEC1



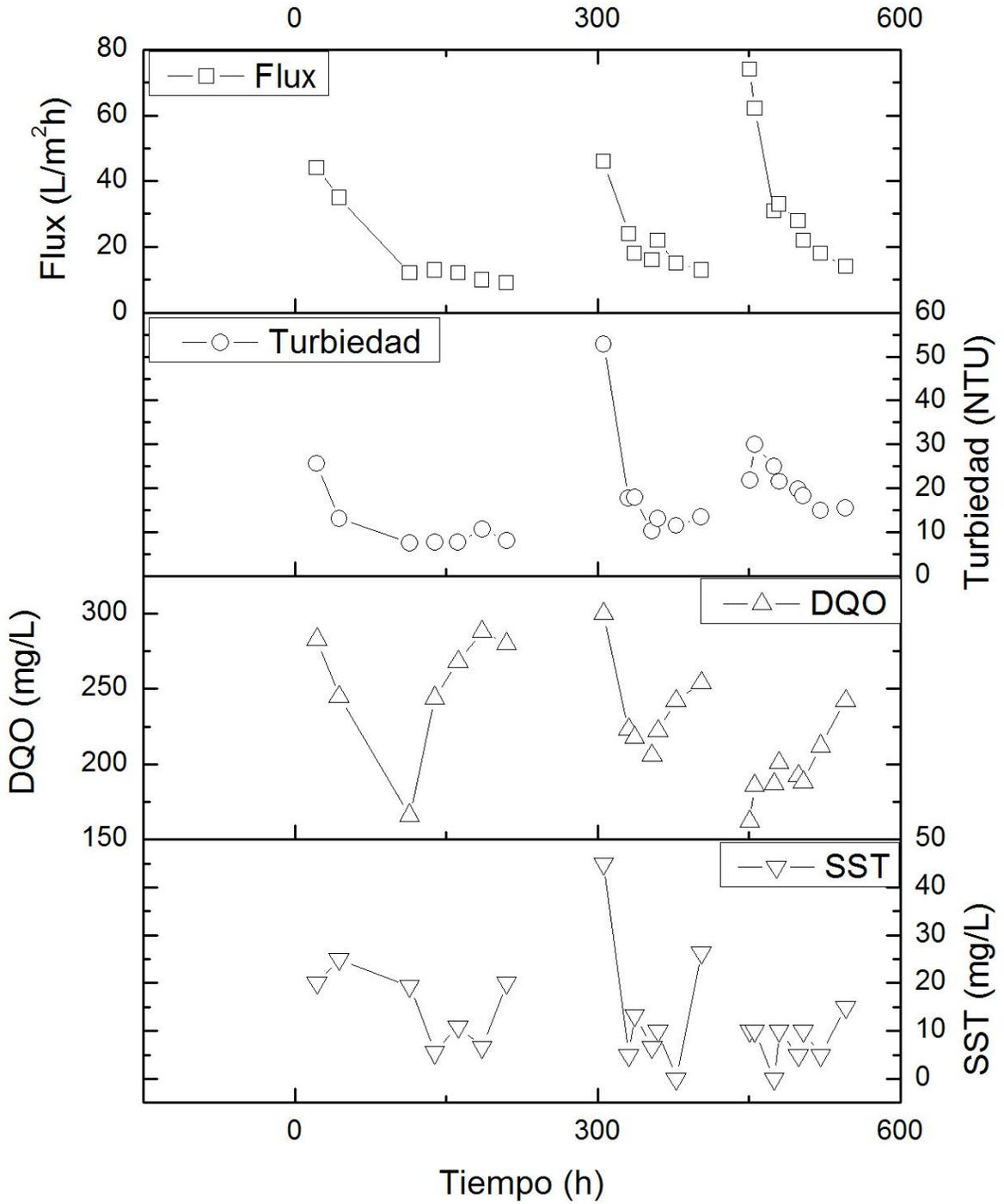
# 01PEC2



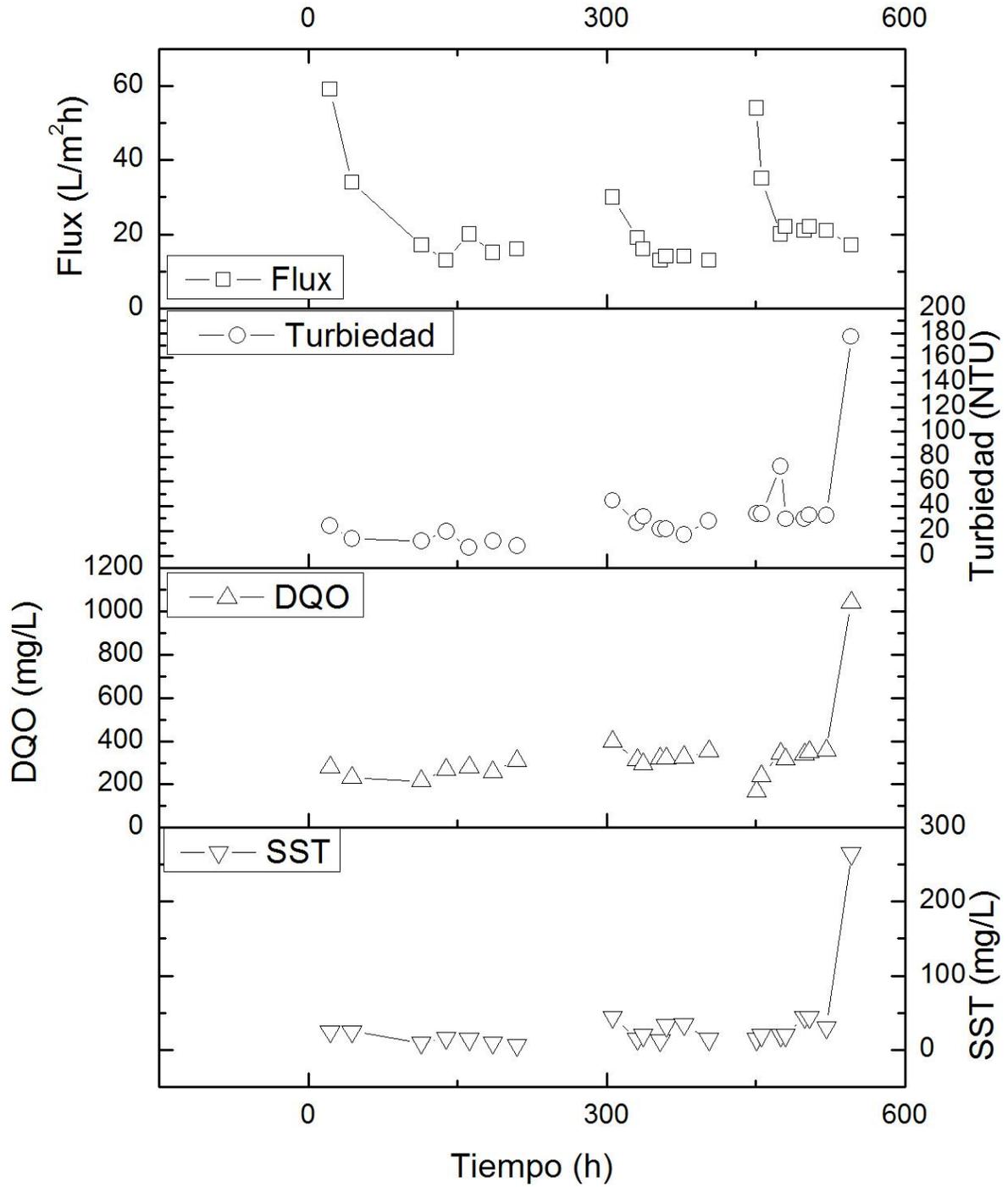
# 01PEC3



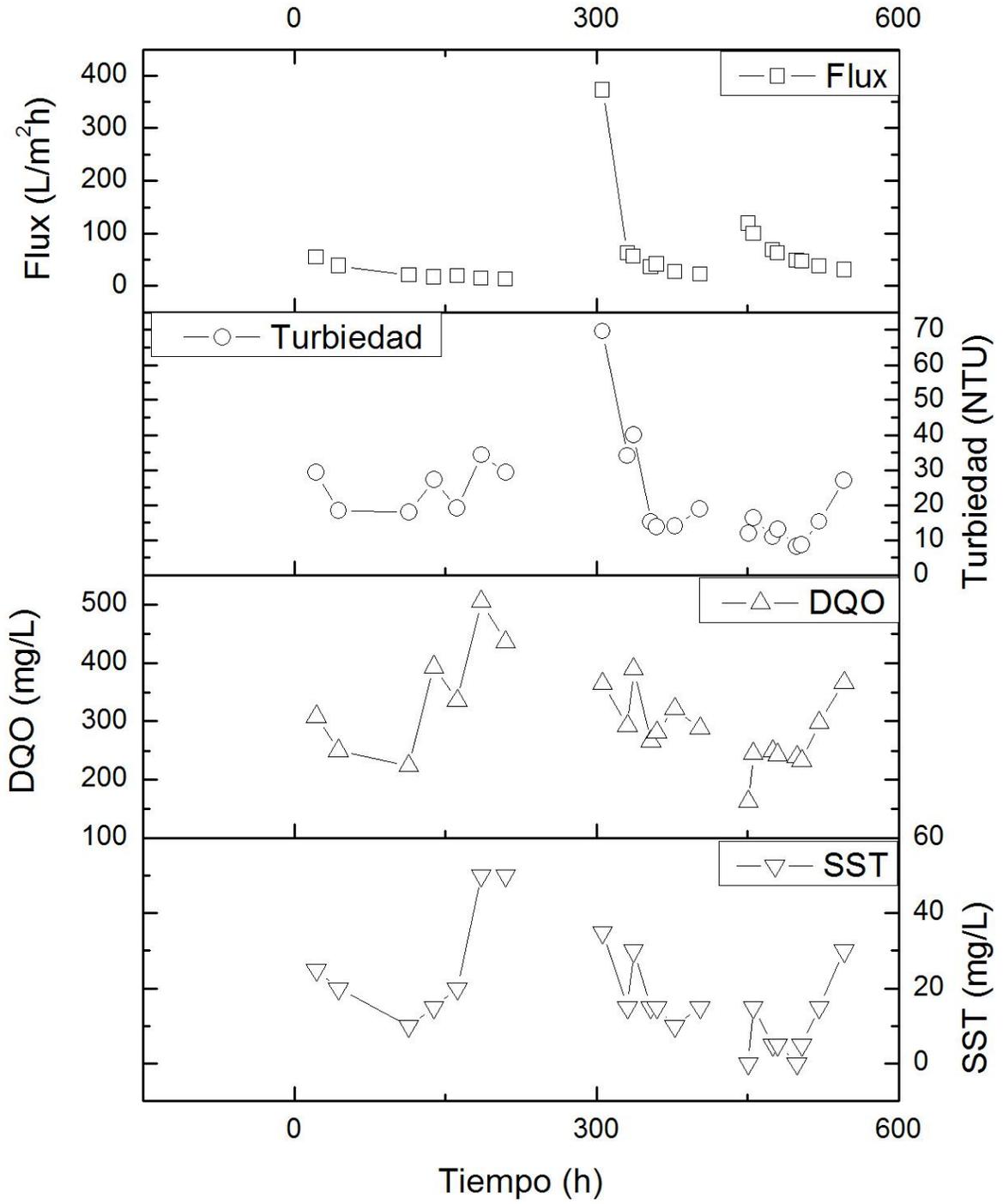
# 03PEA1



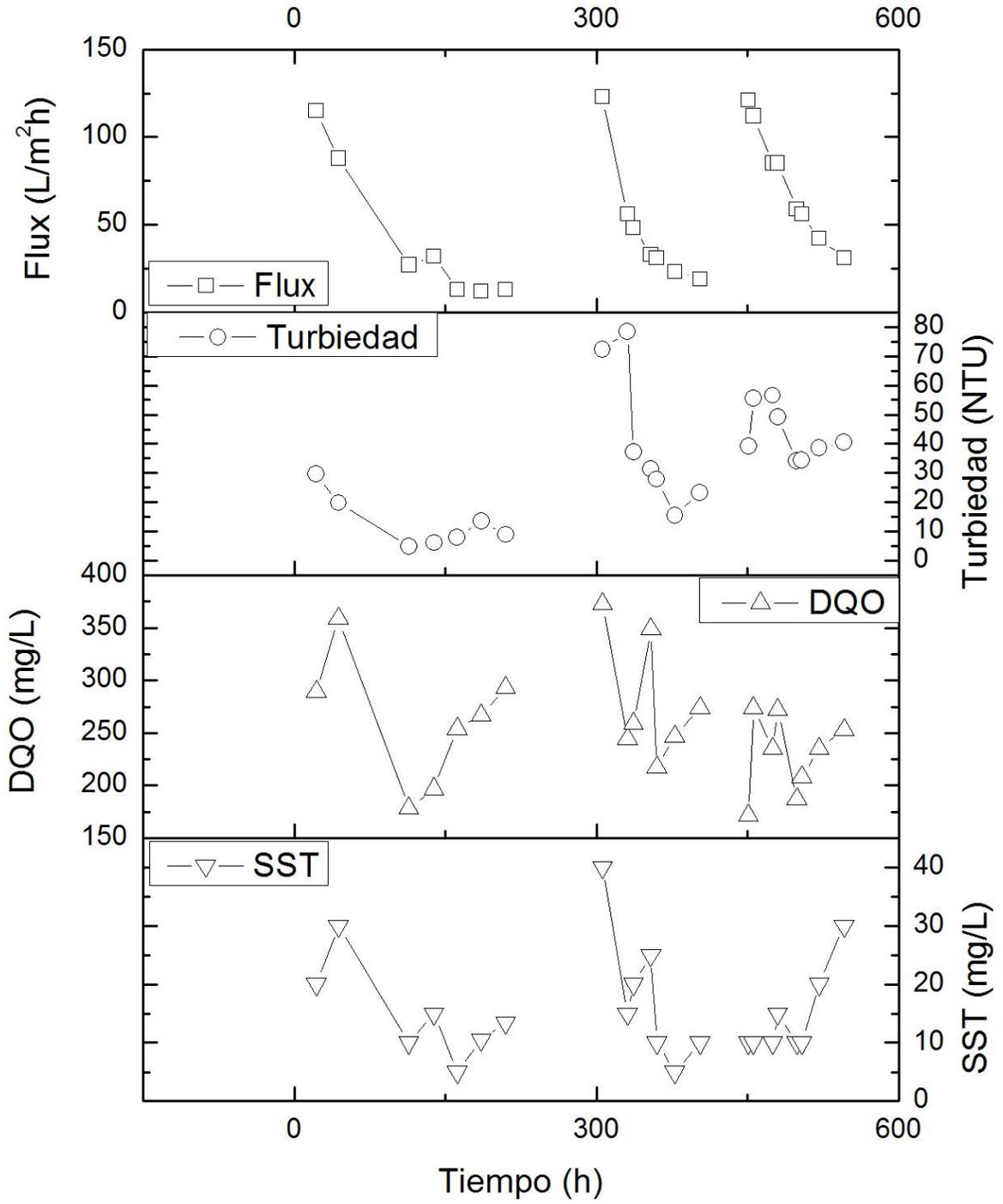
# 03PEA2



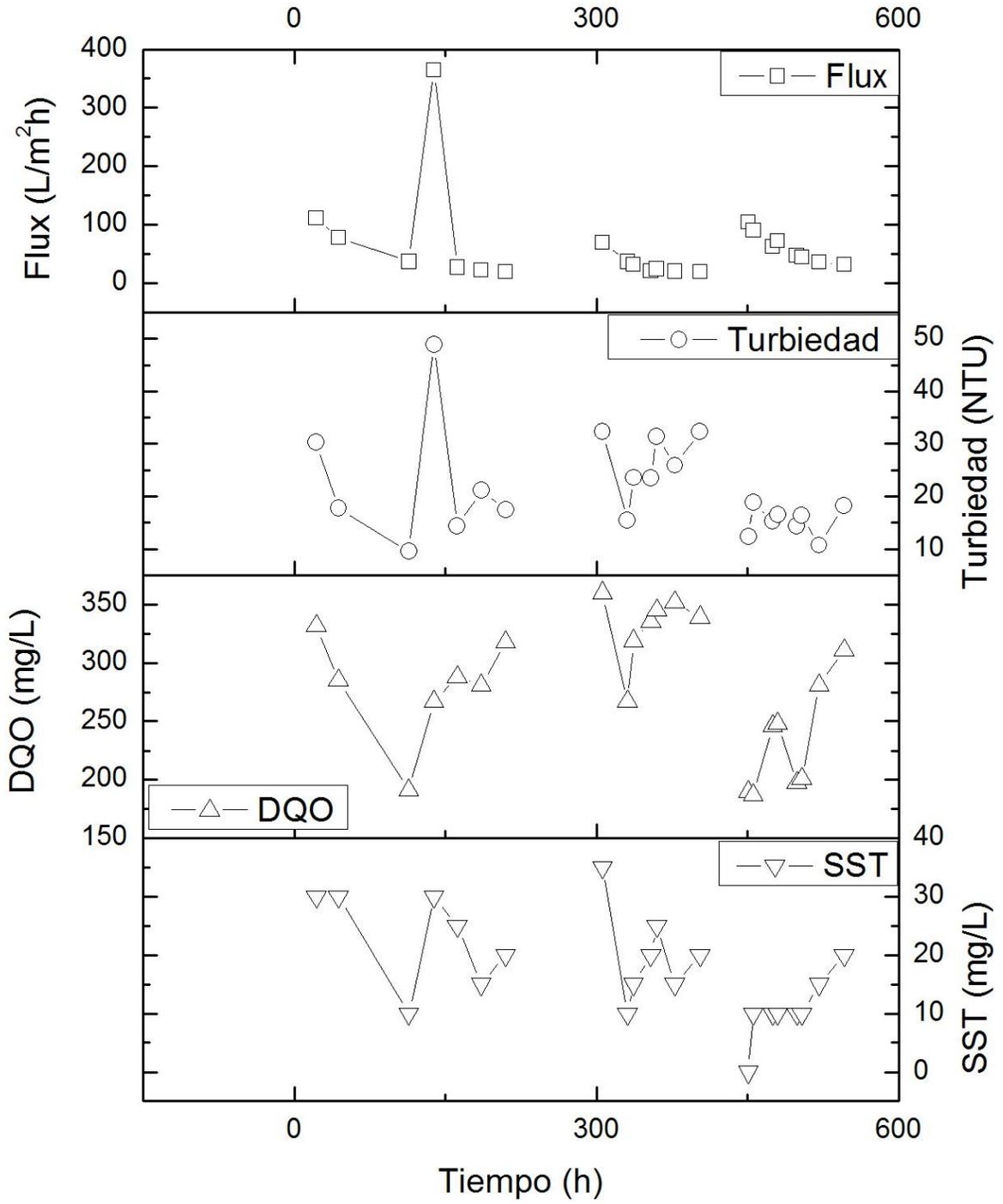
# 03PEA3



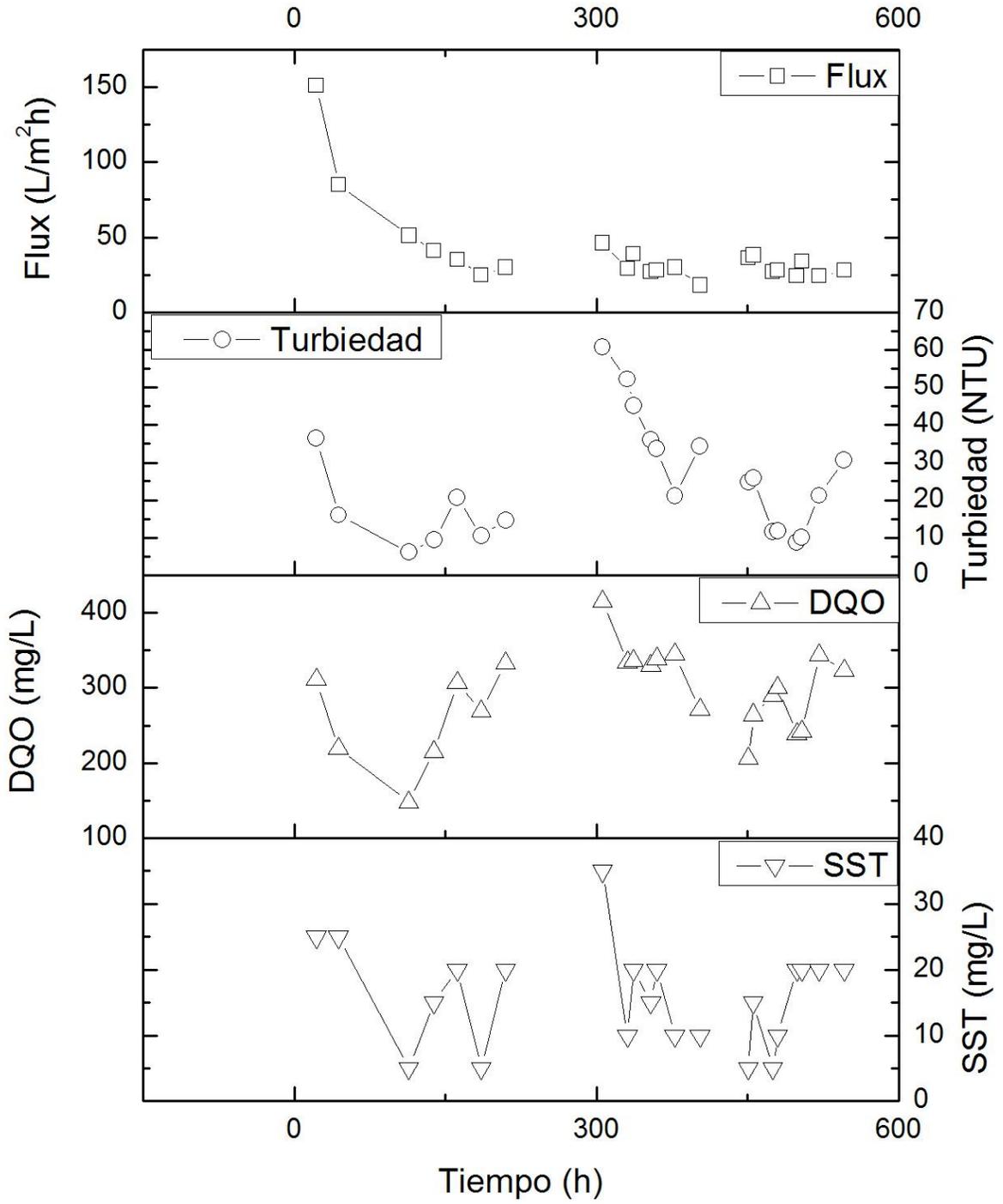
# 03PEB1



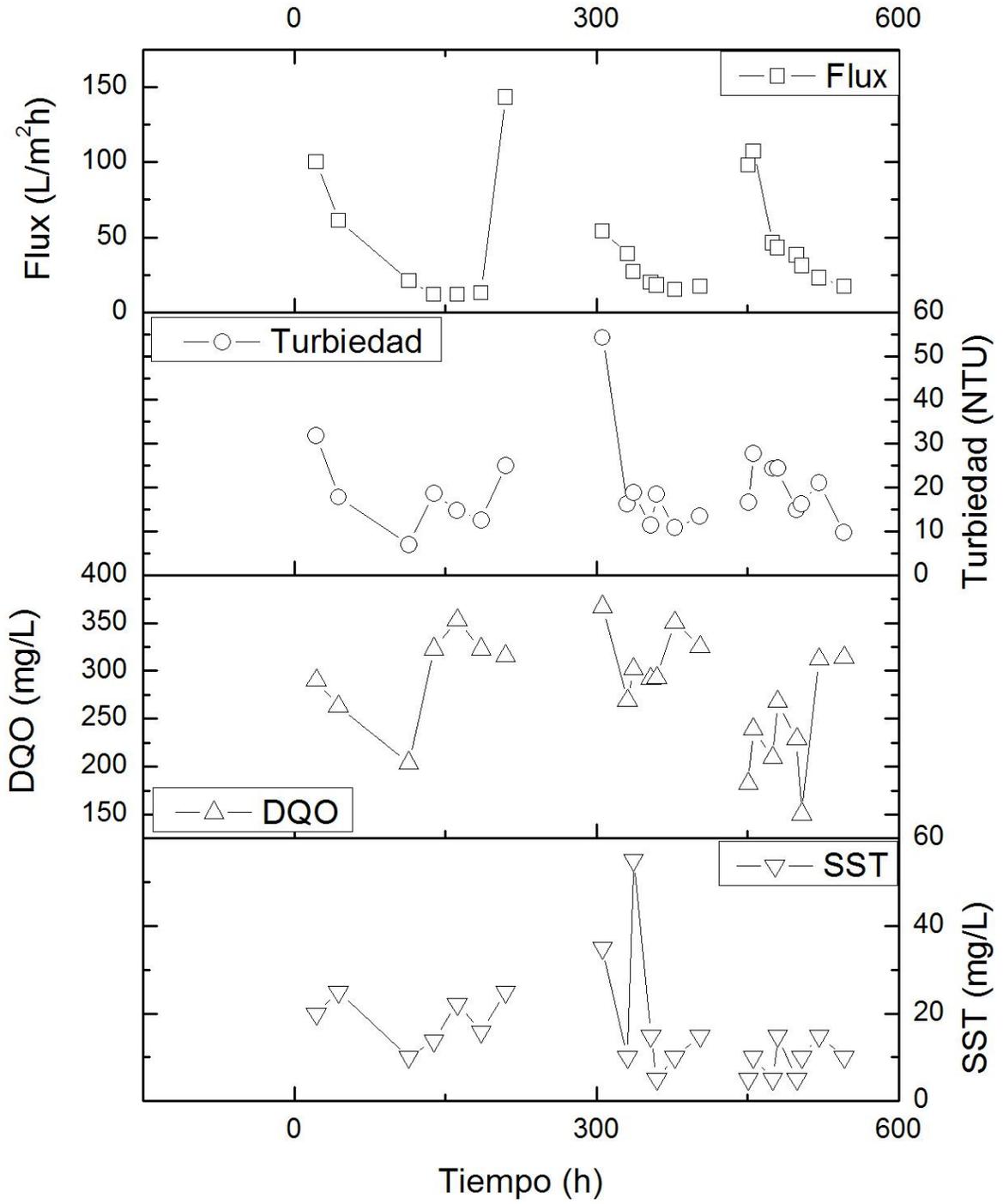
# 03PEB2



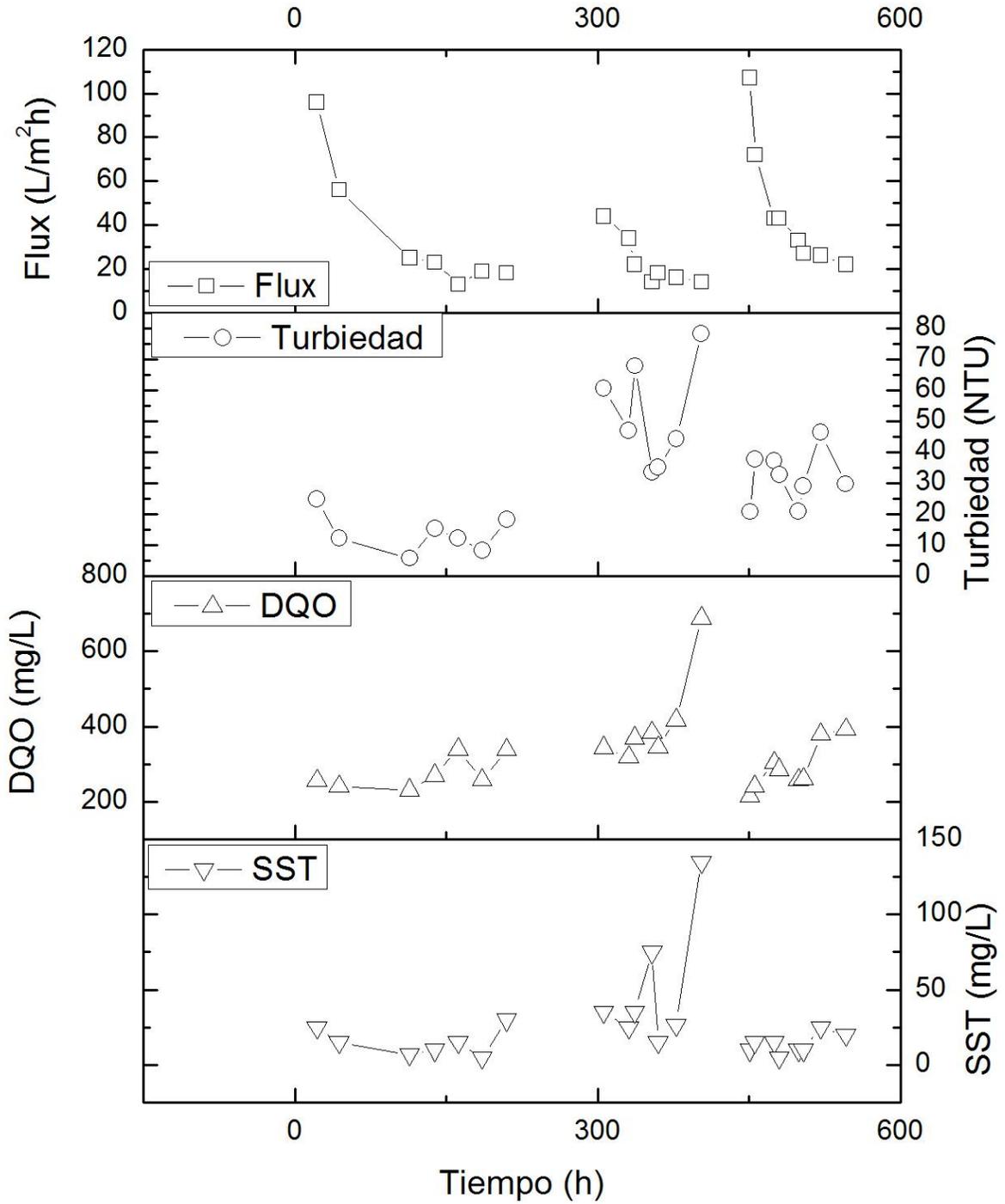
# 03PEB3



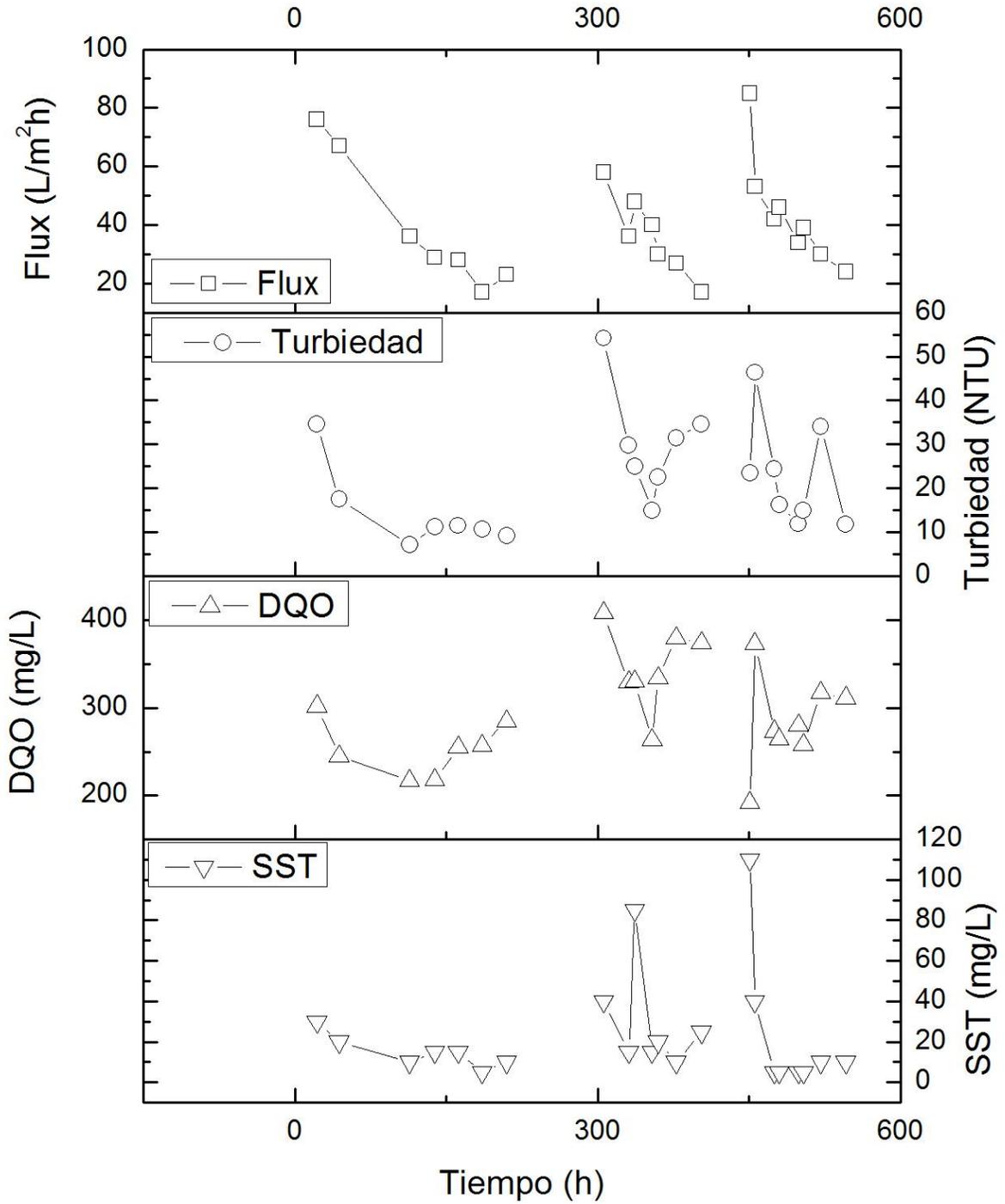
# 03PEC1



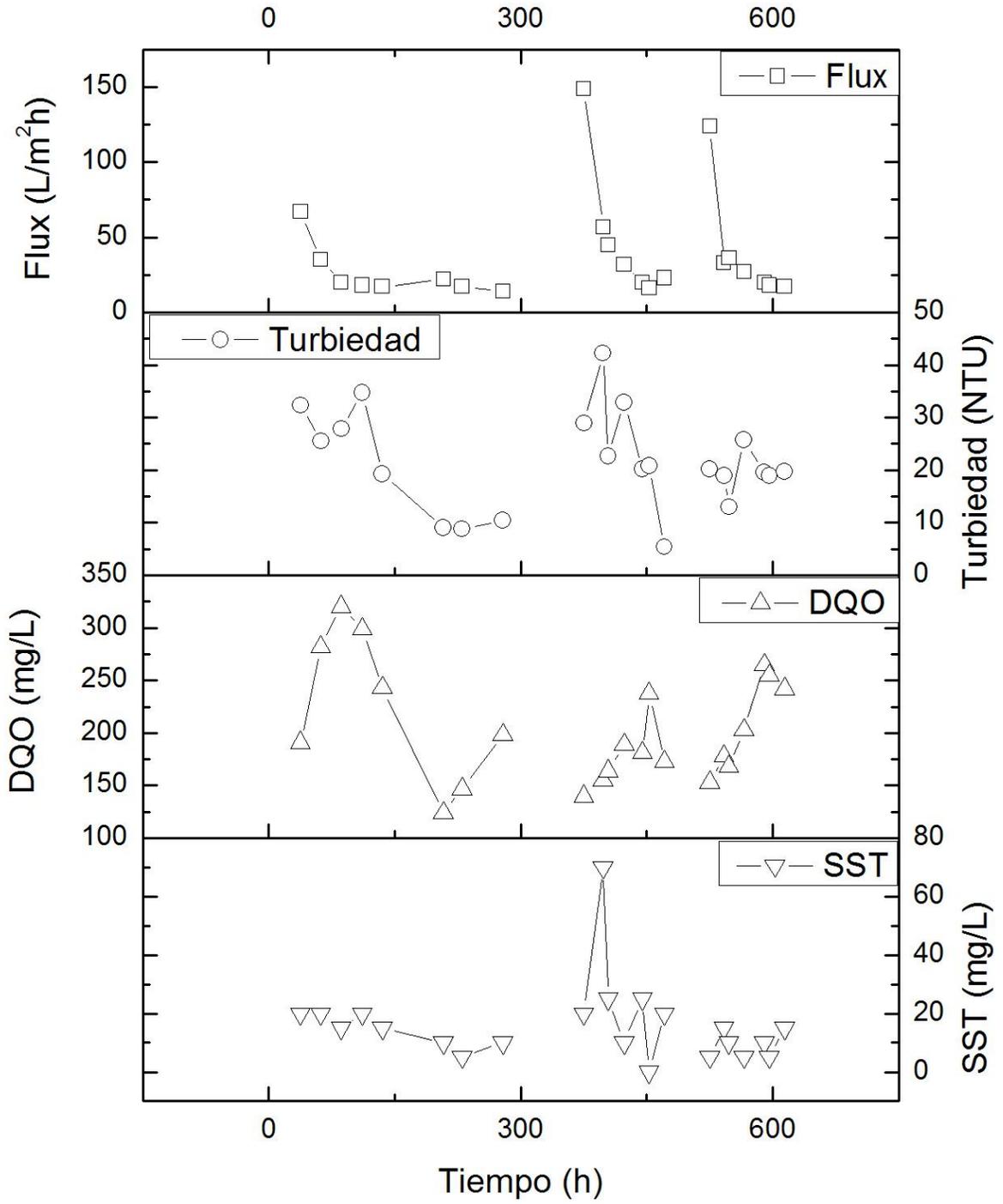
# 03PEC2

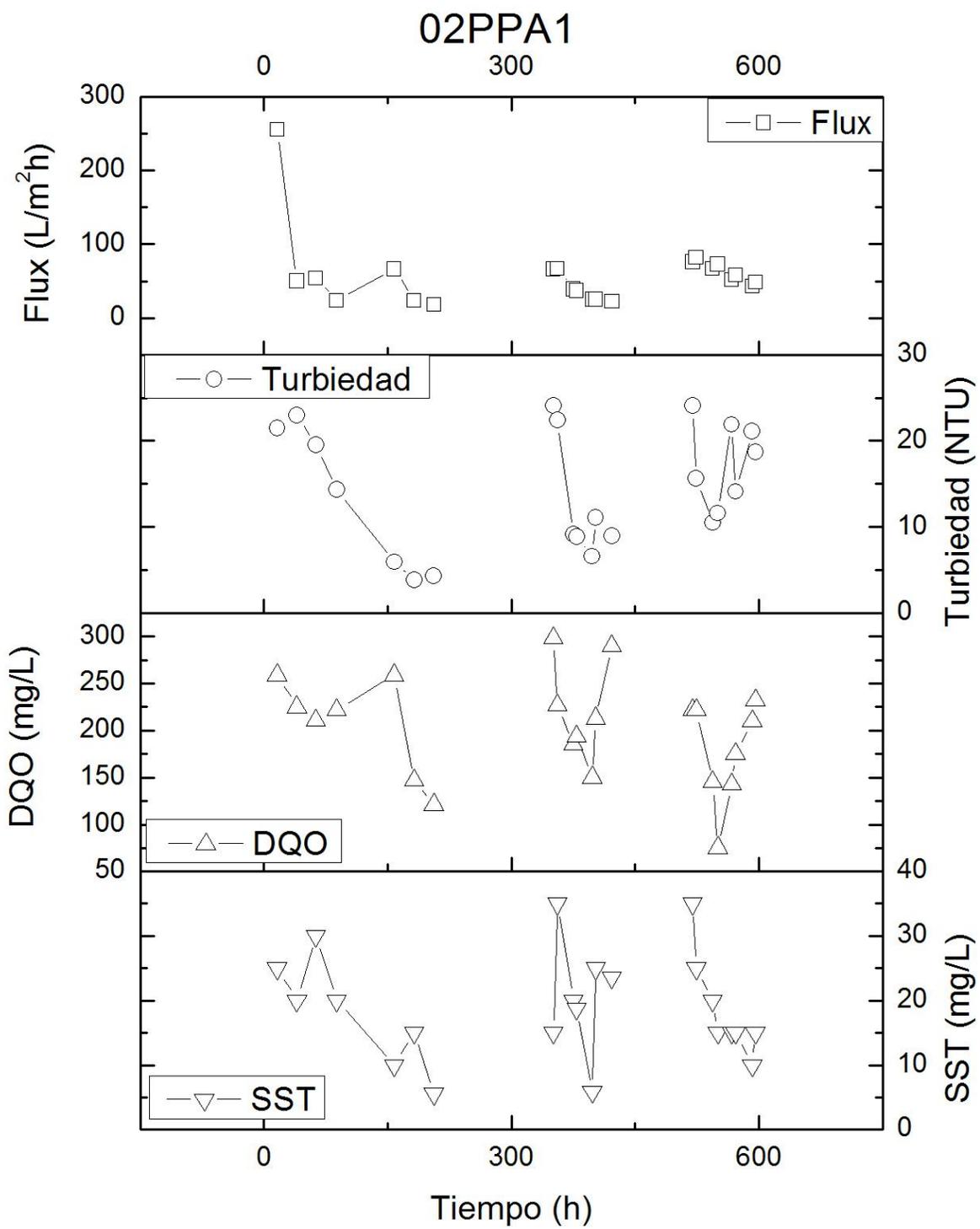


# 03PEC3

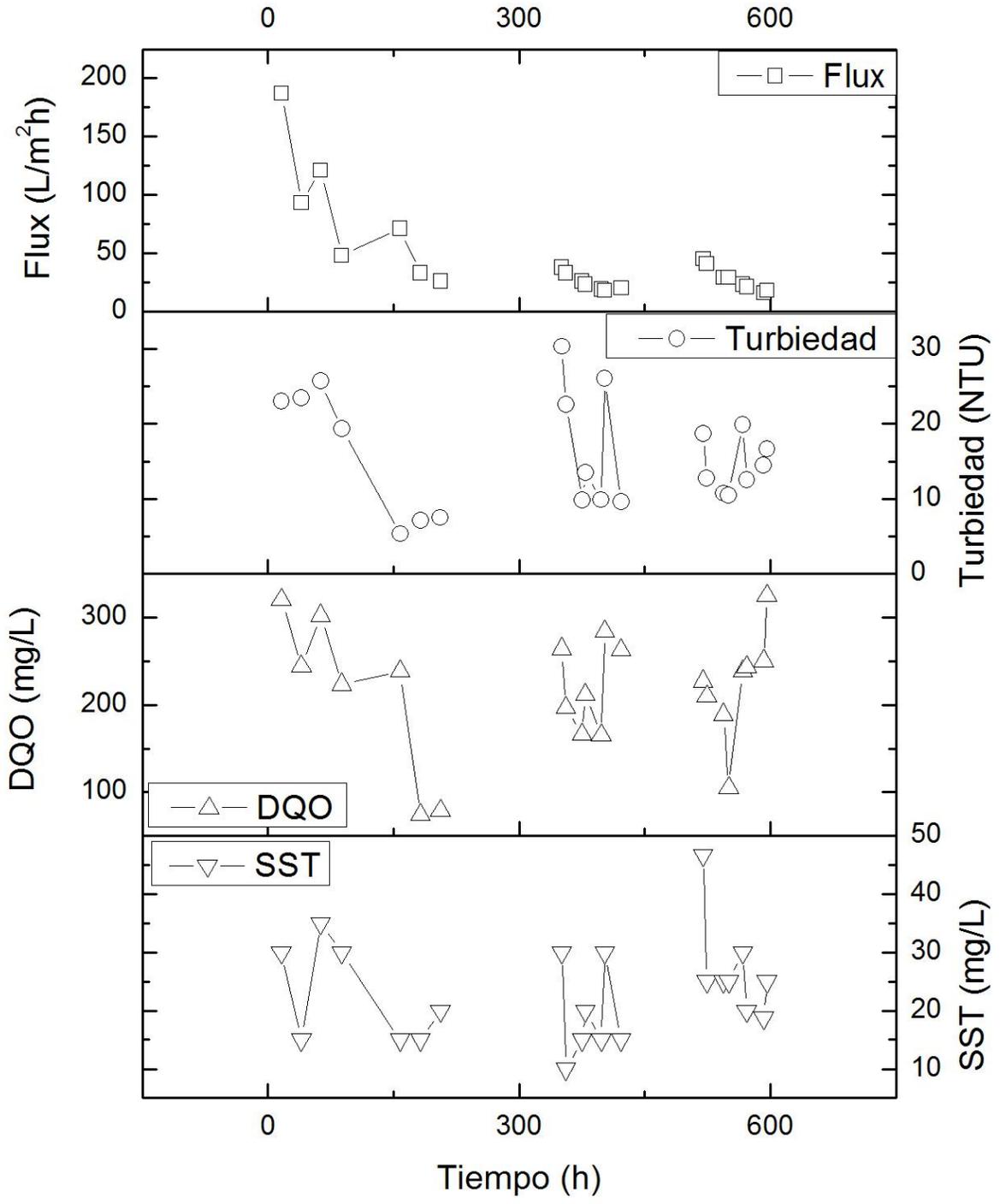


# 04PPC1

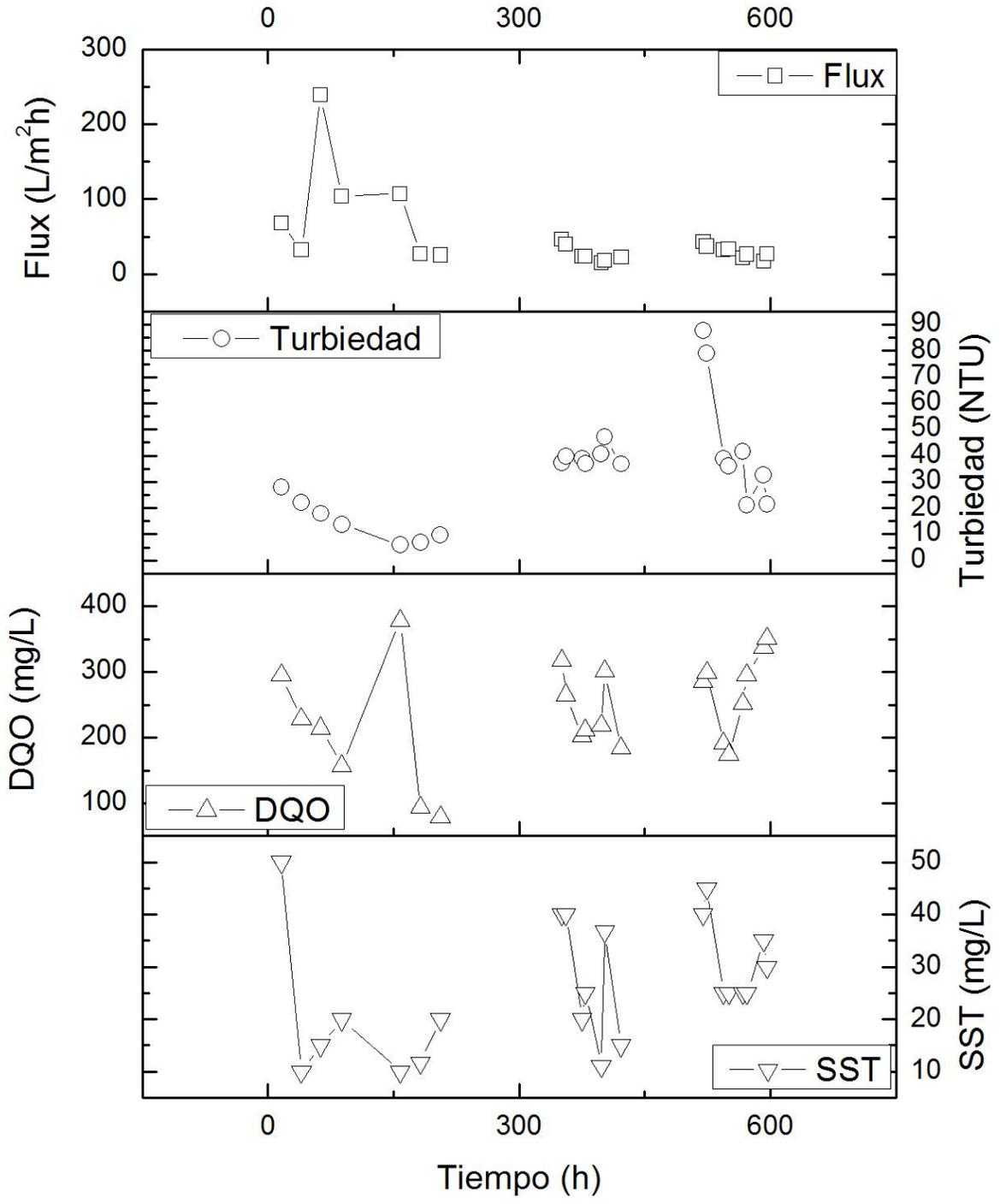




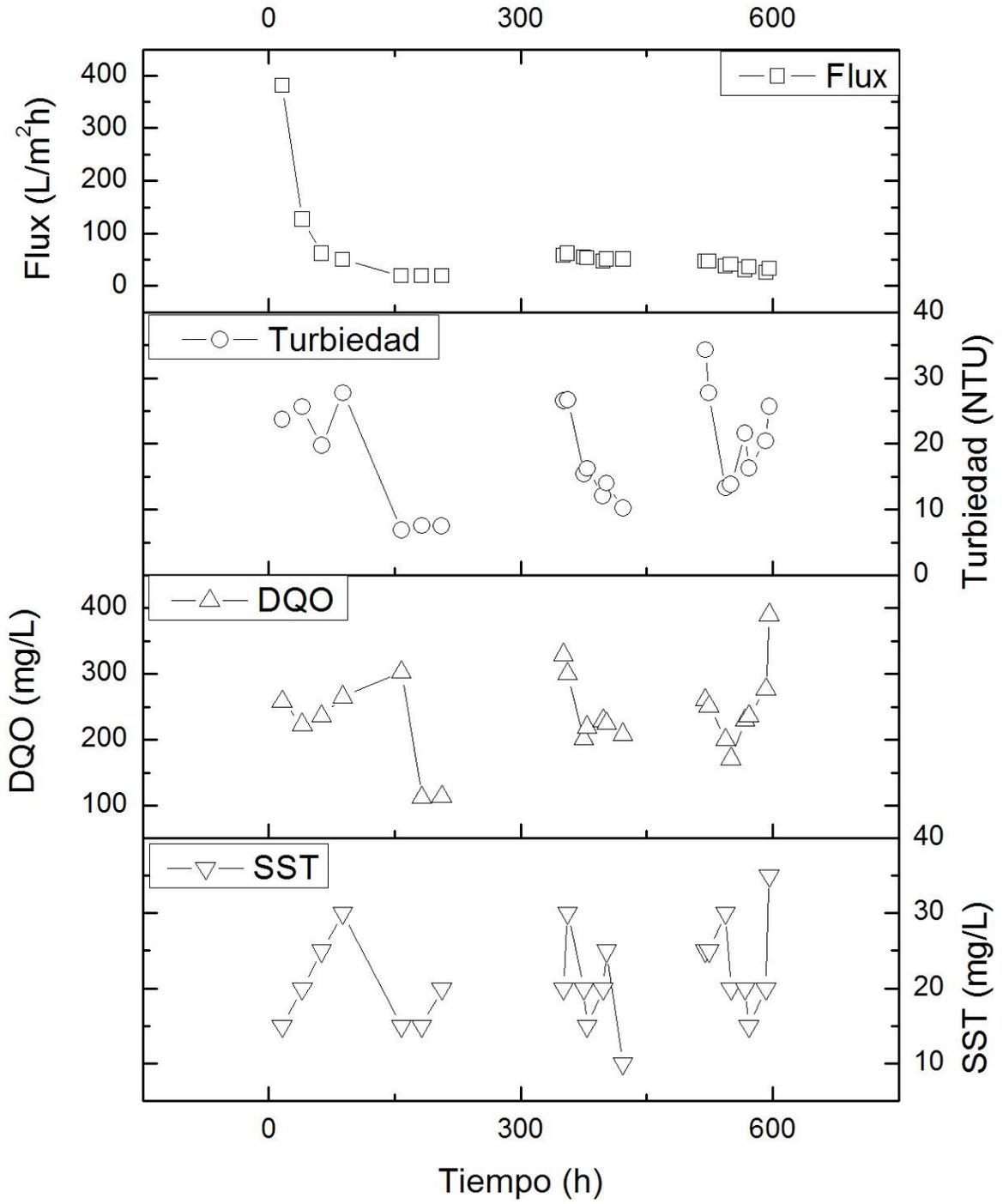
# 02PPA2



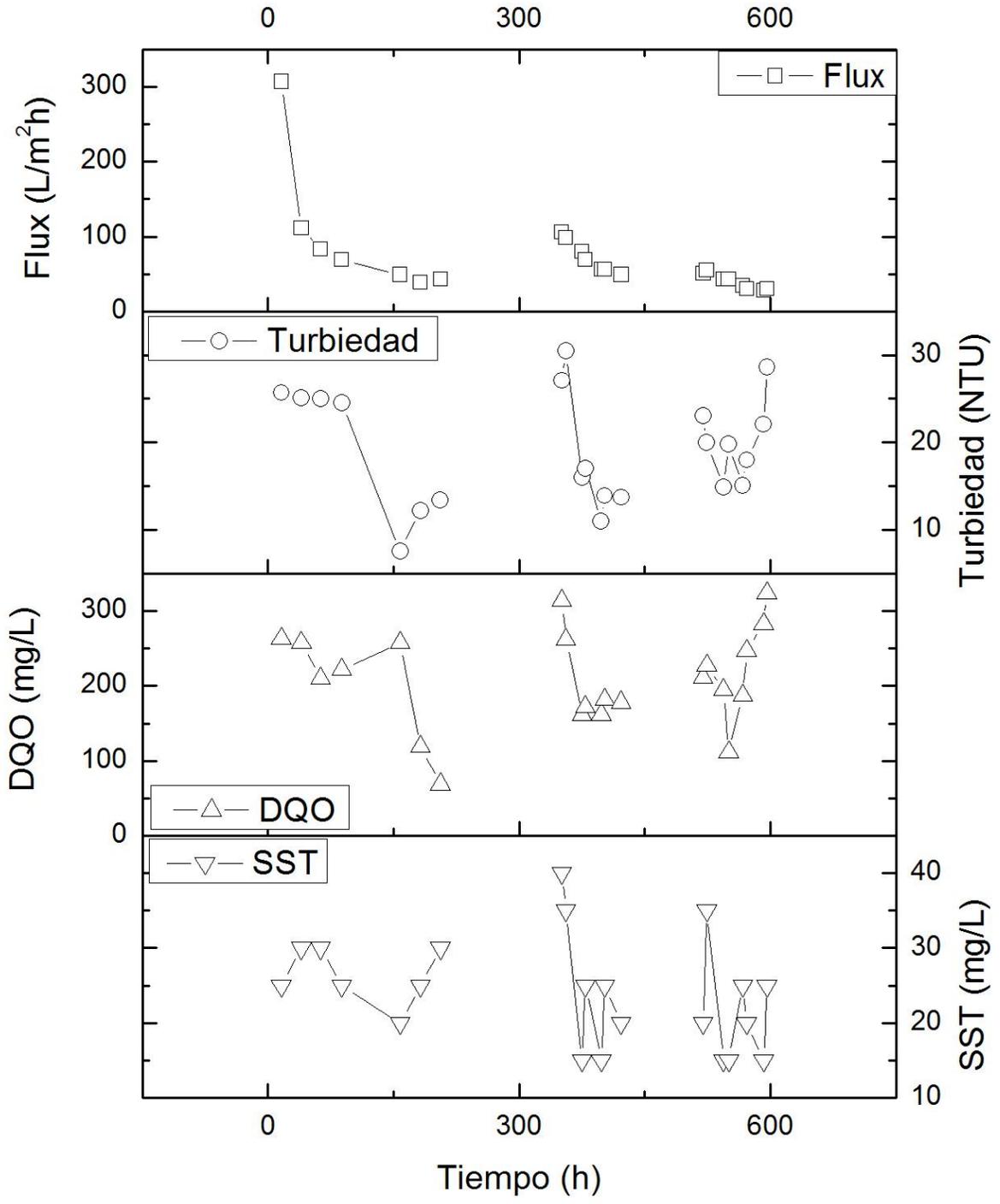
# 02PPA3



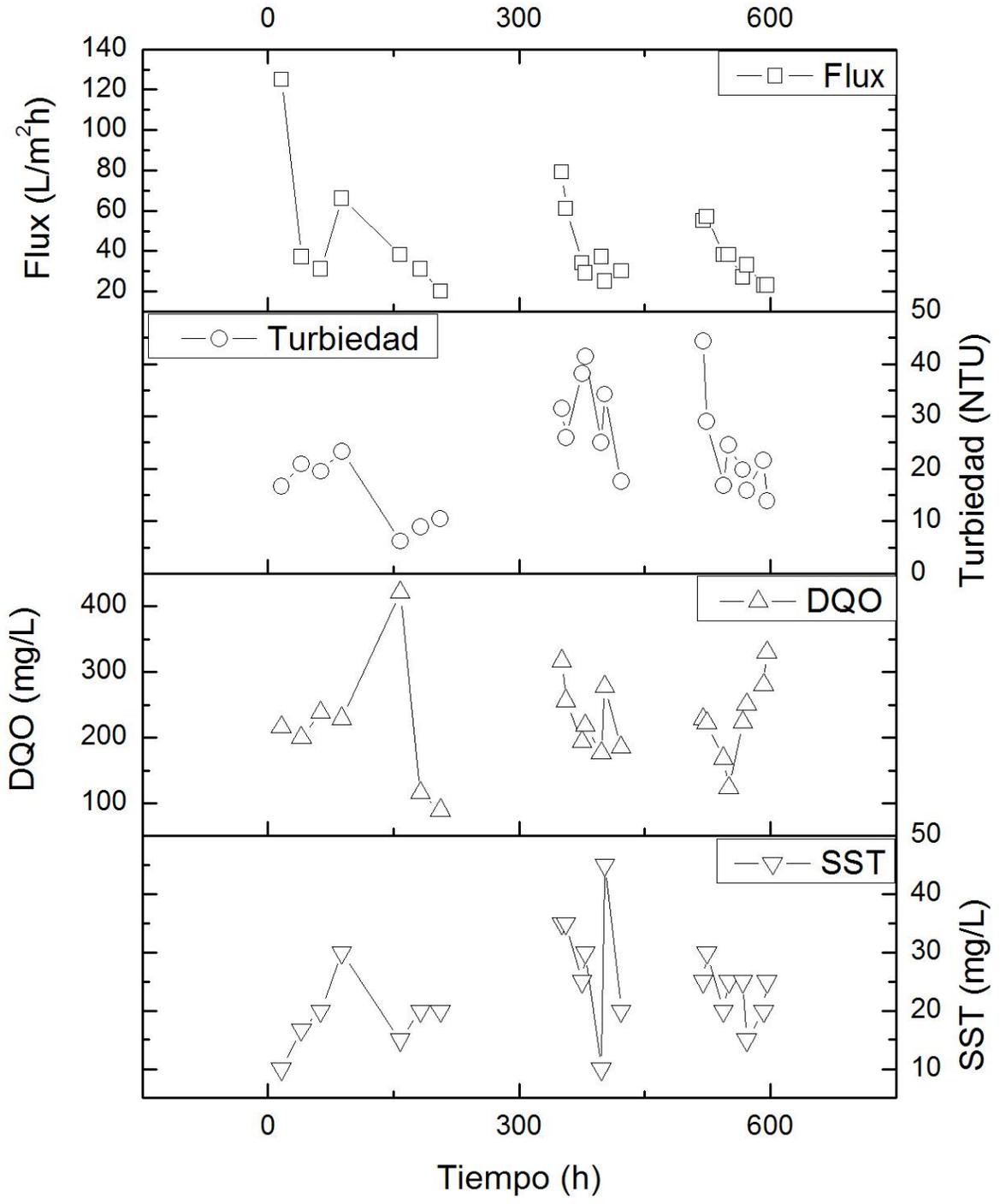
# 02PPB1



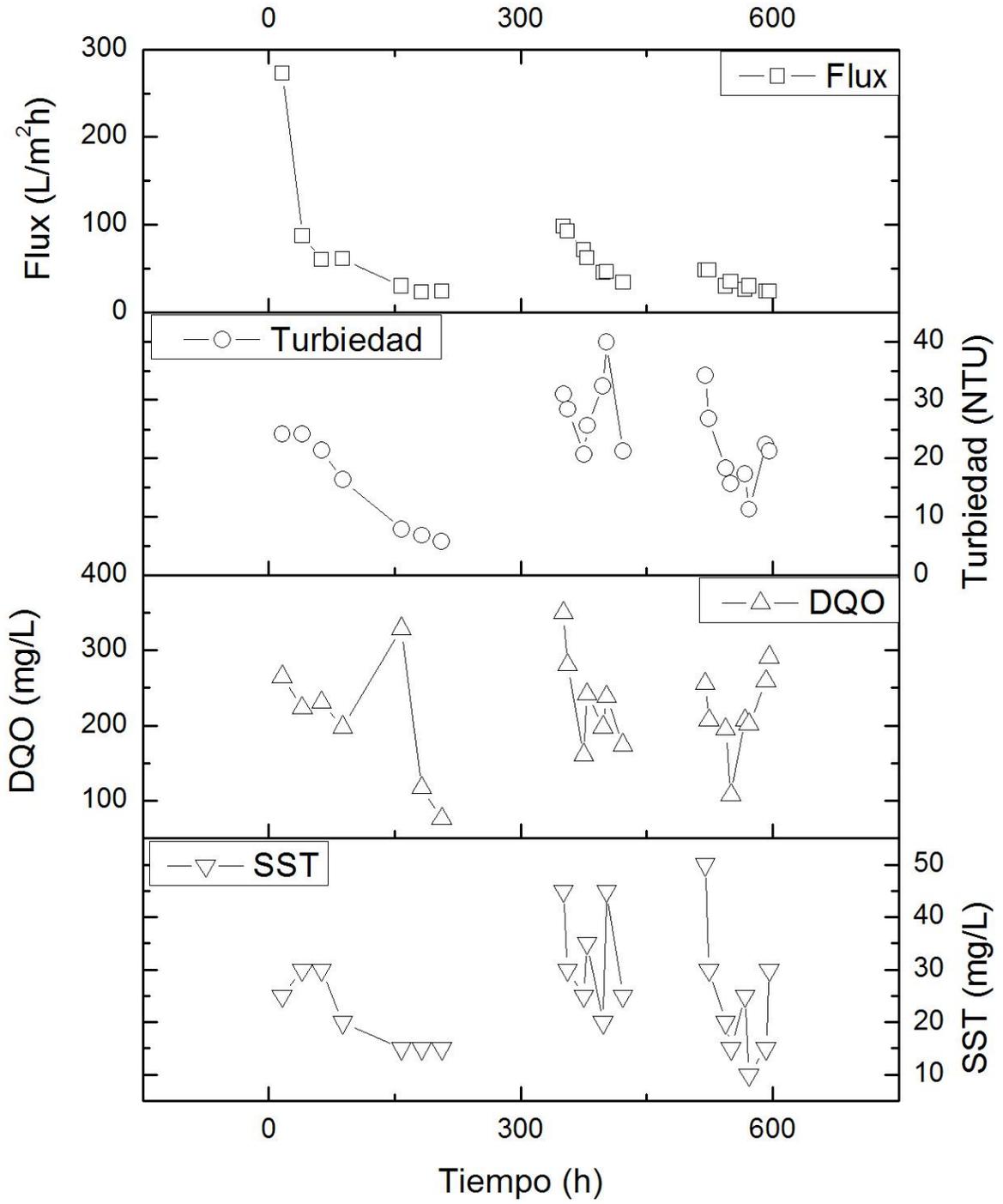
# 02PPB2



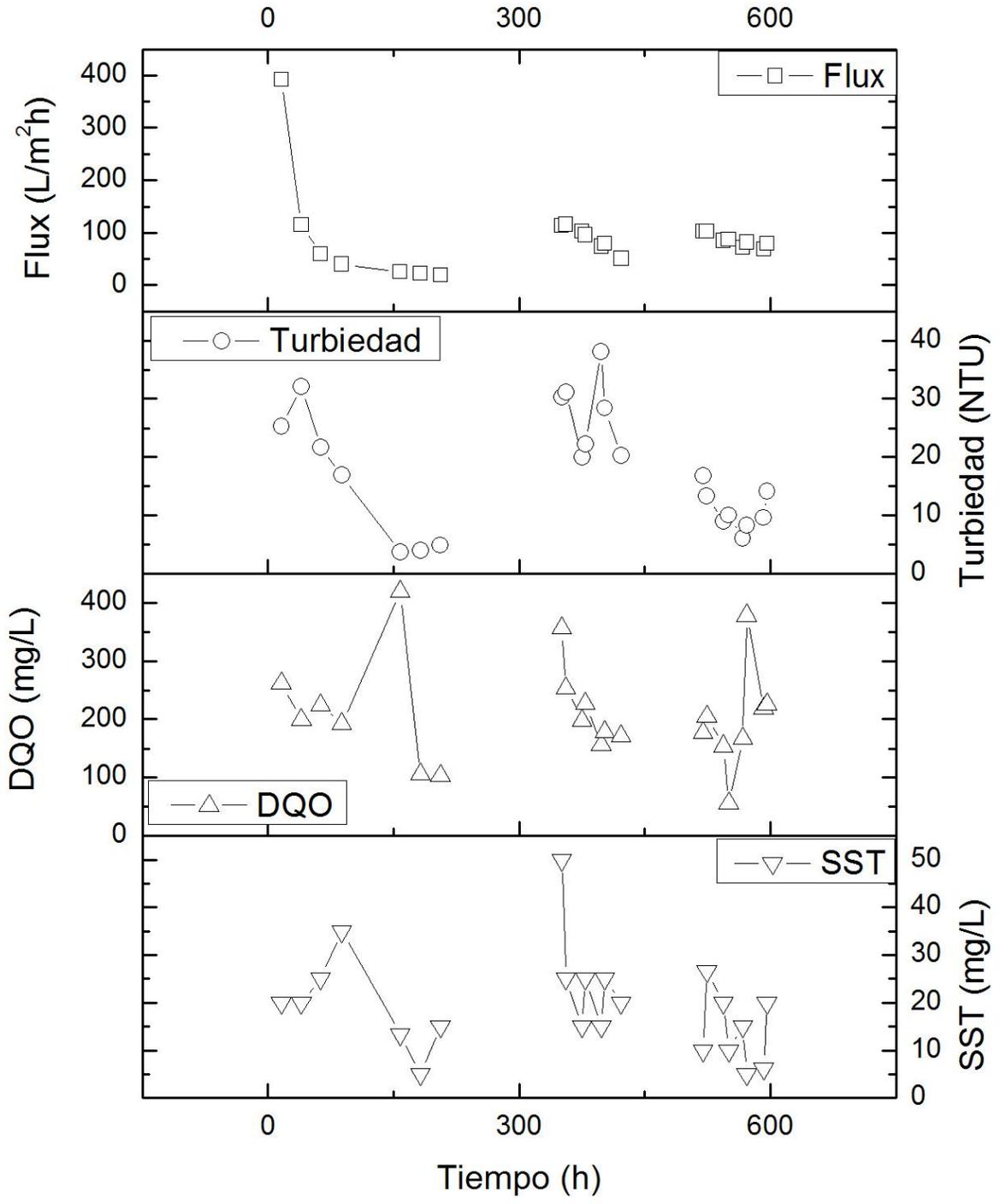
# 02PPB3



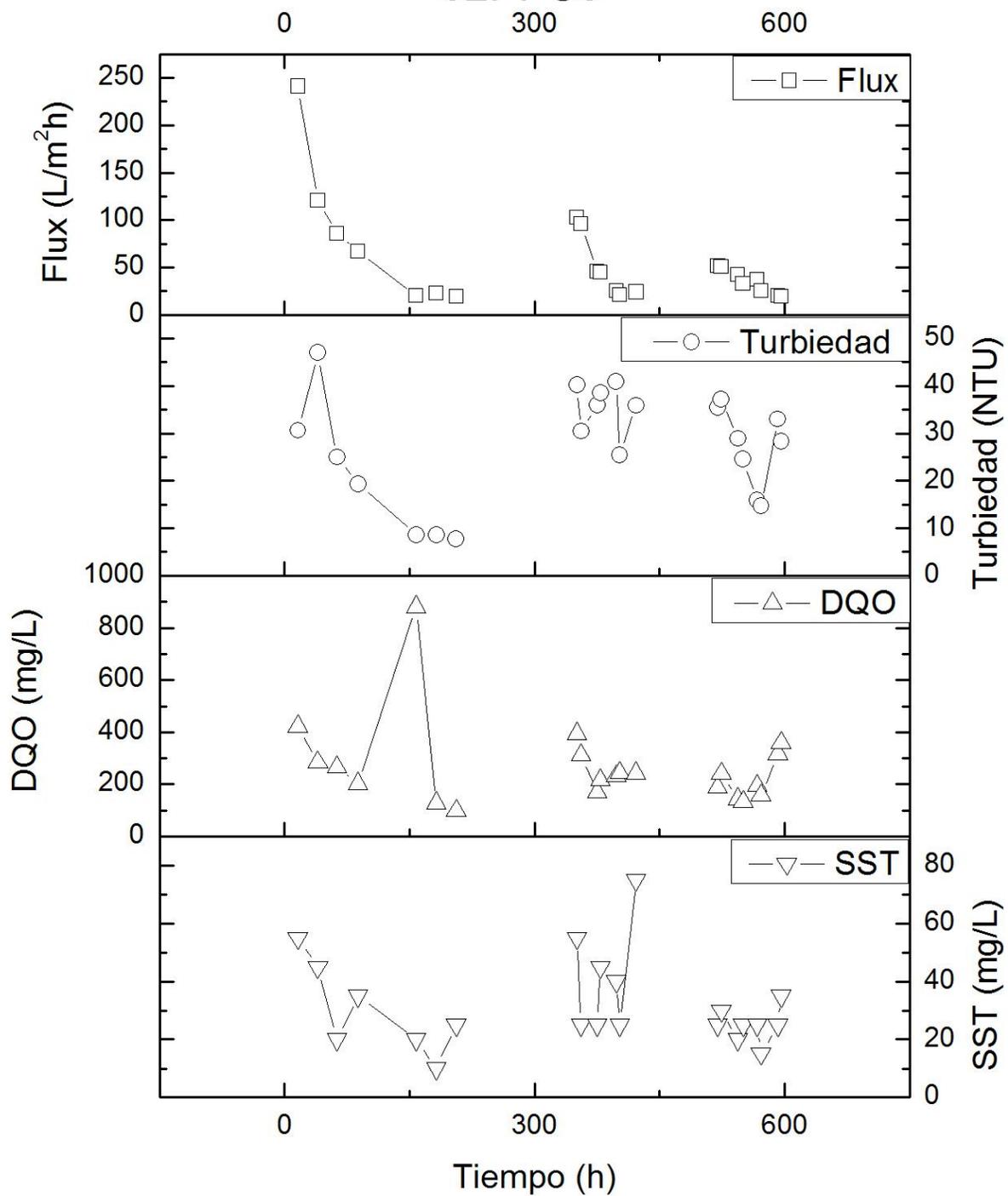
# 02PPC1



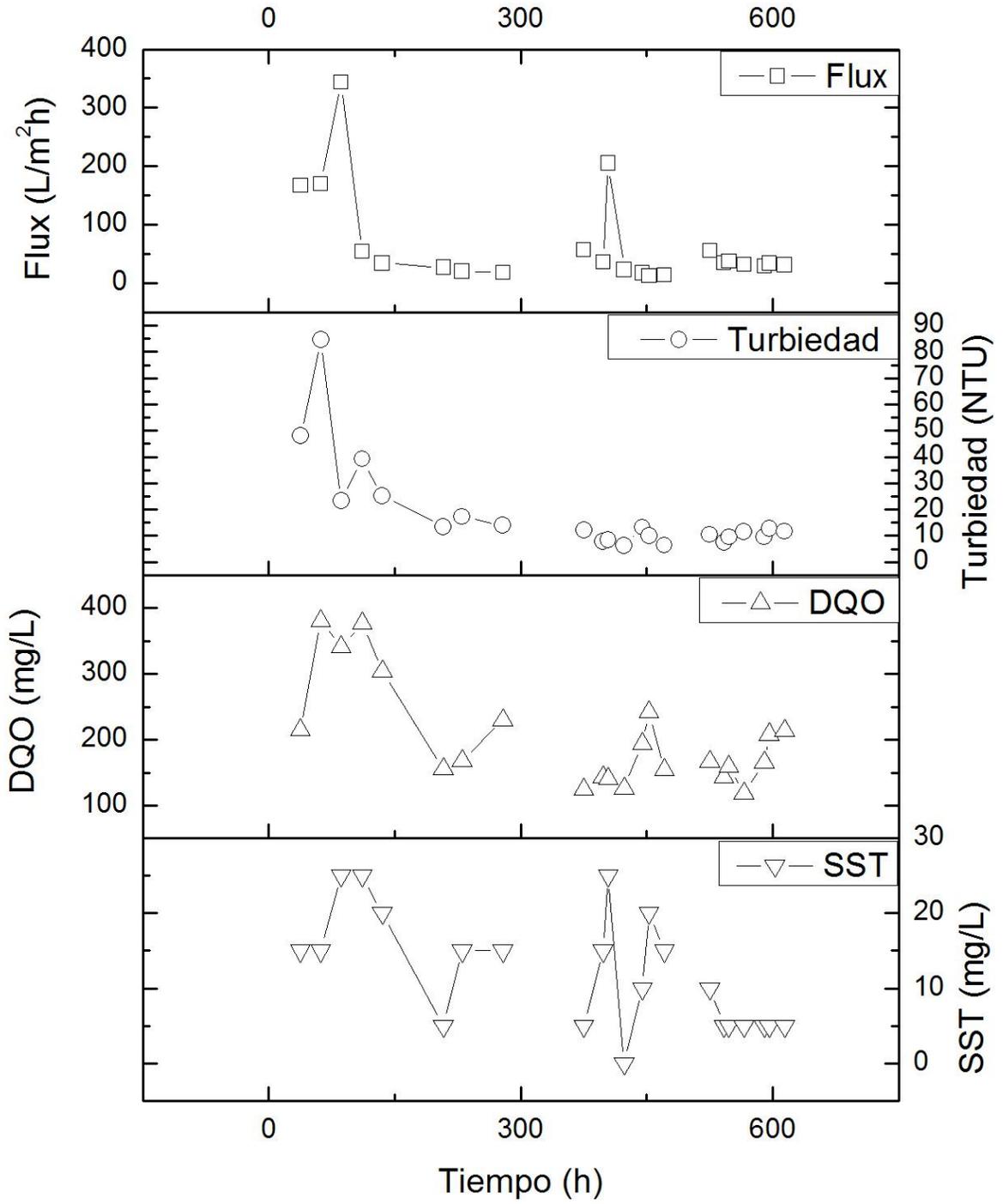
# 02PPC2



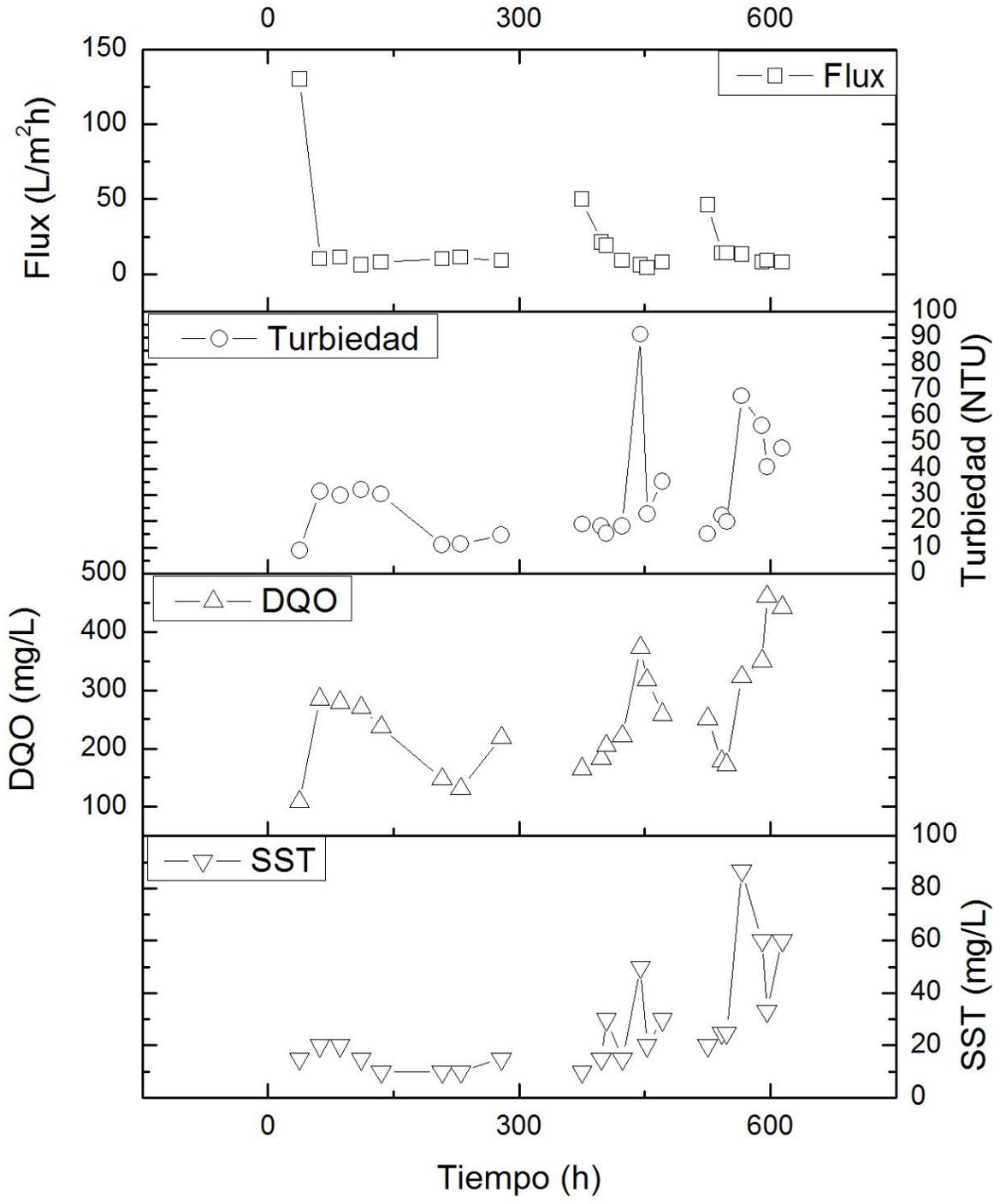
# 02PPC3



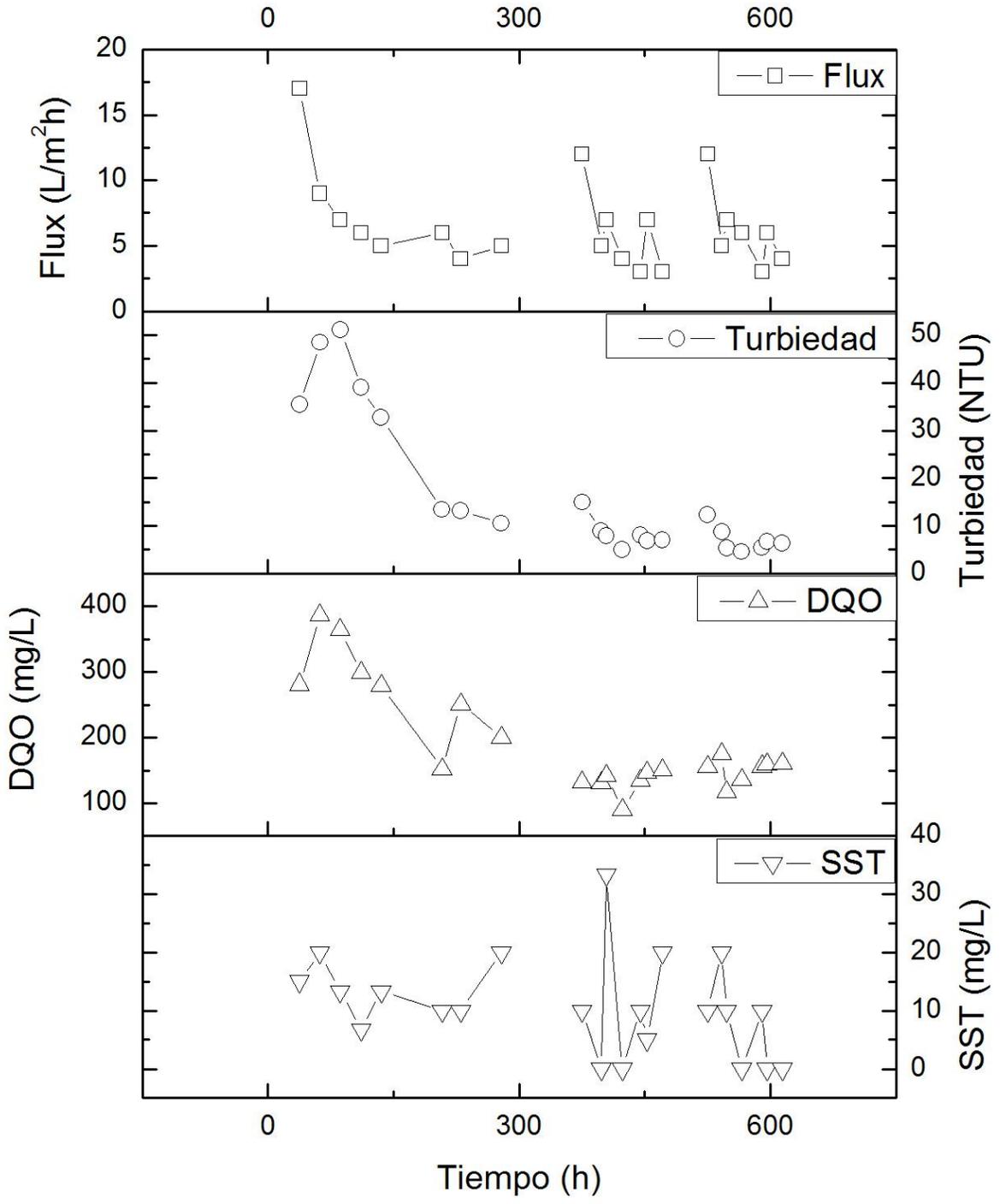
# 04PPA1



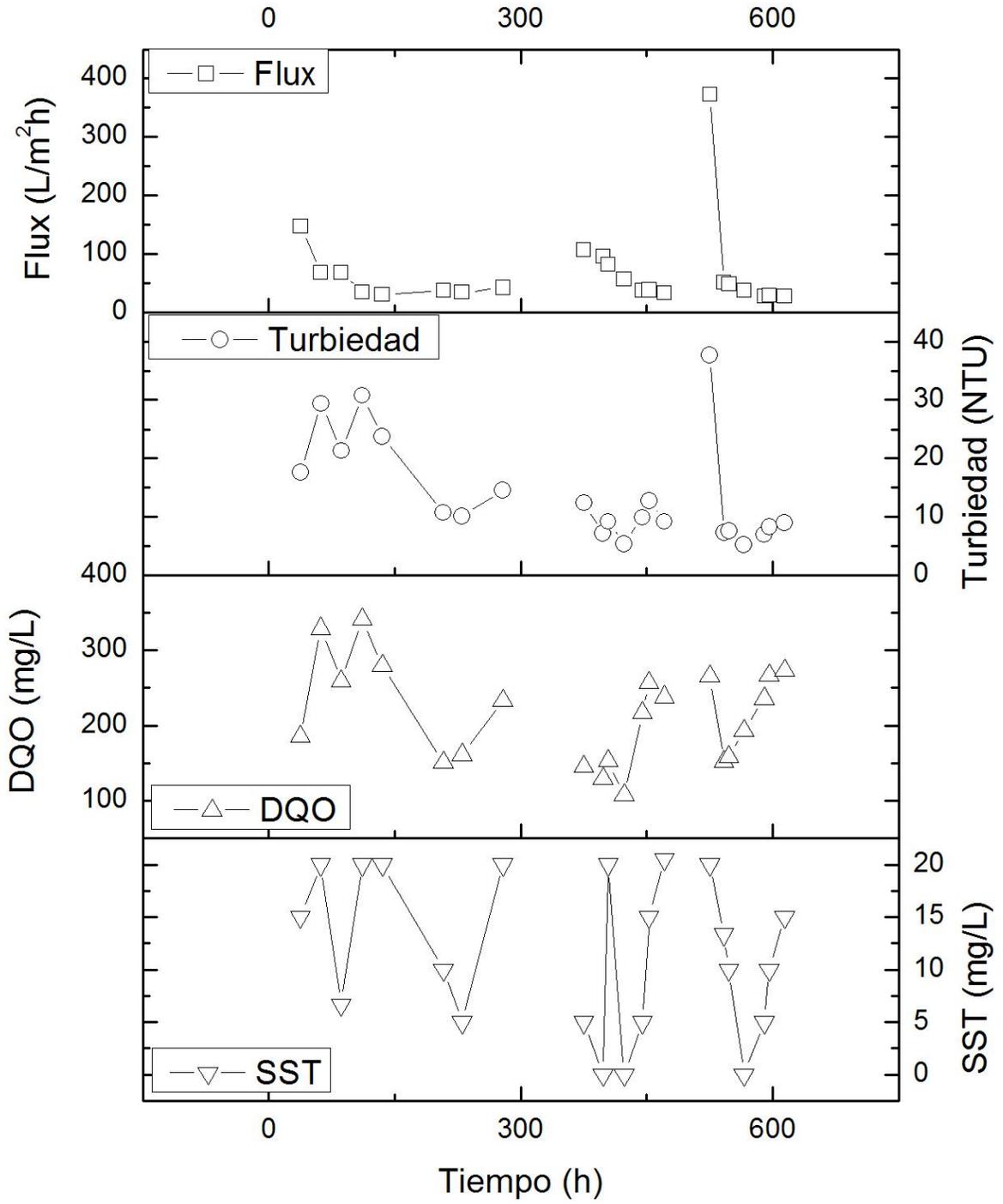
# 04PPA2



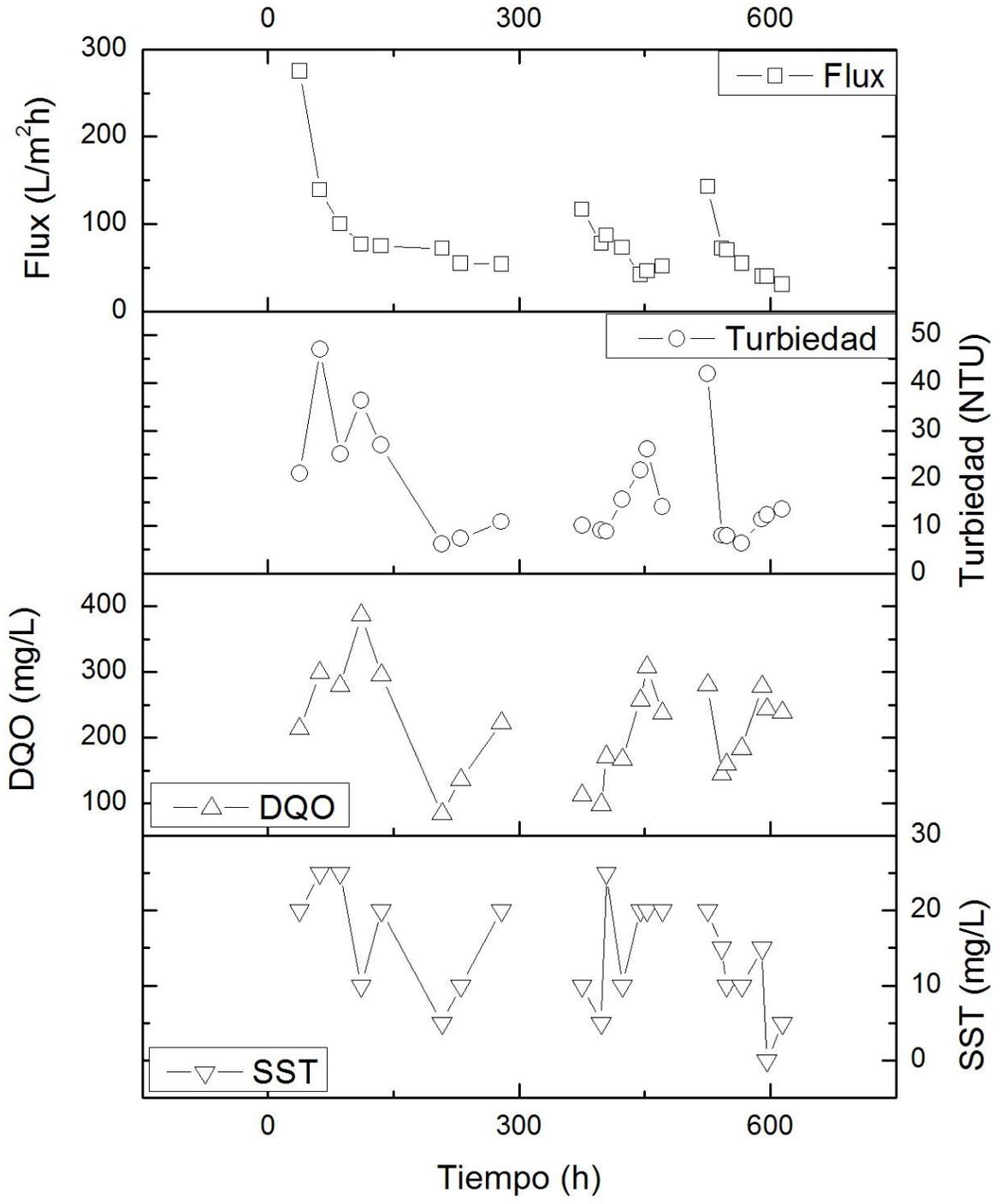
# 04PPA3



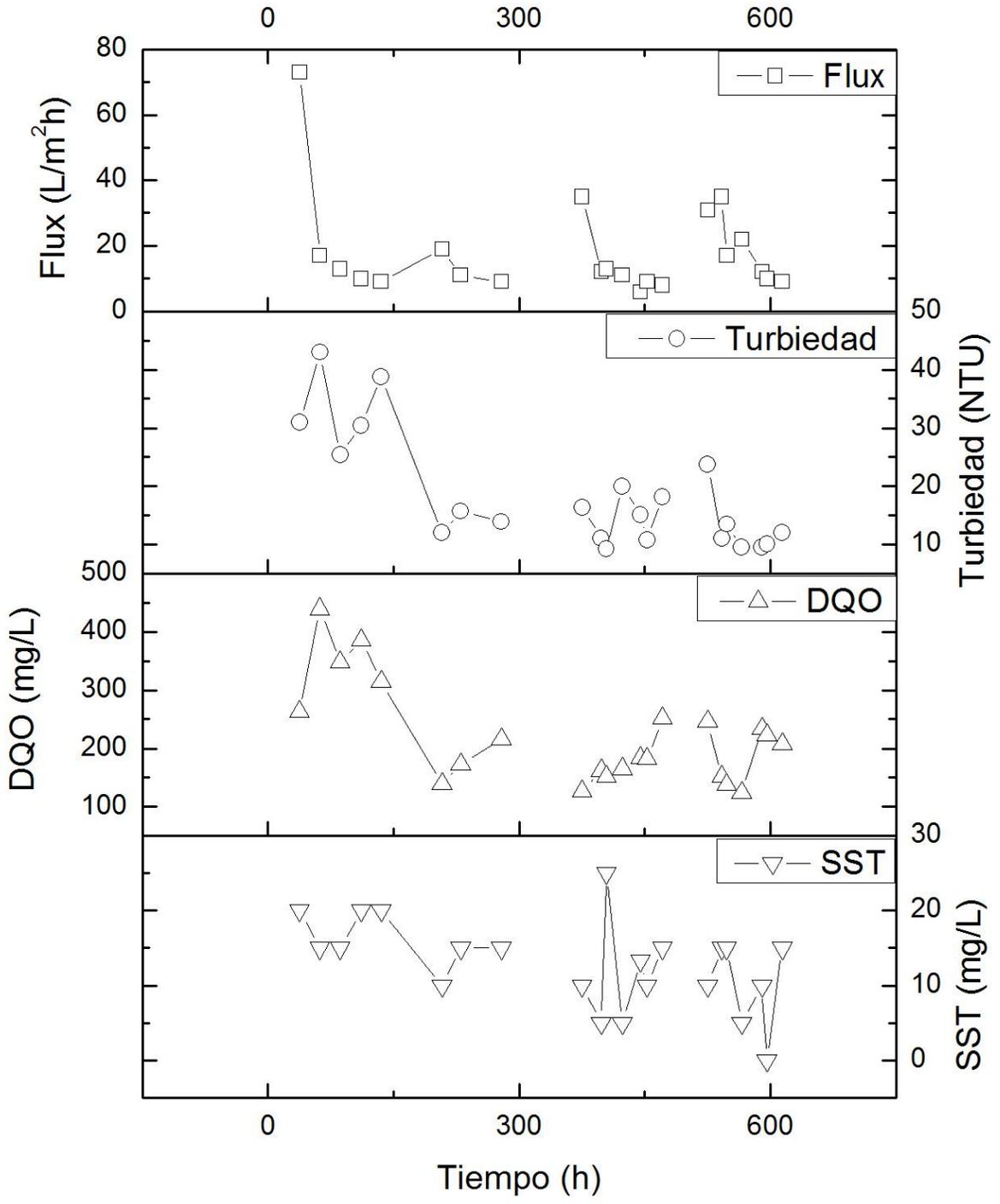
# 04PPB1



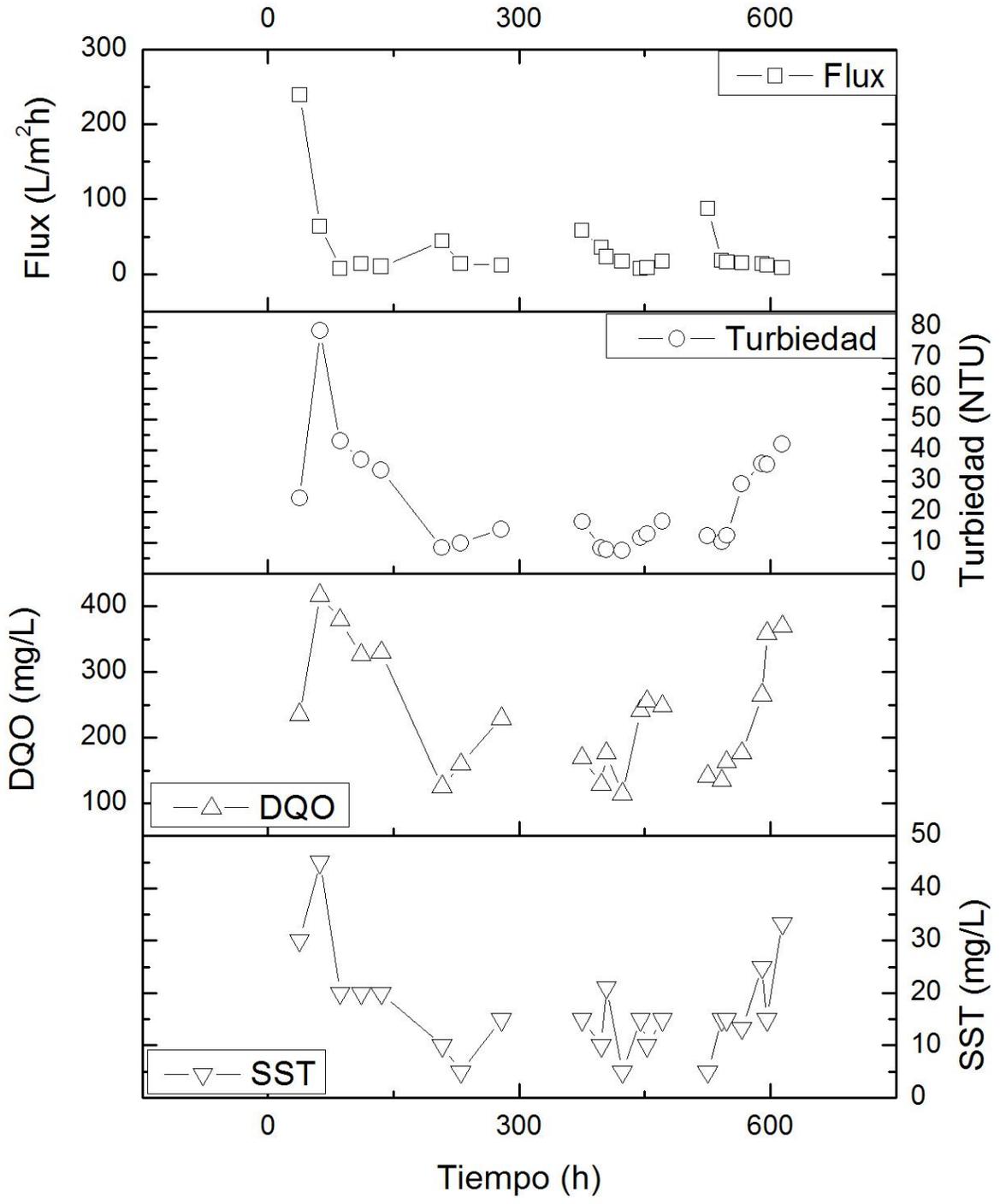
# 04PPB2



# 04PPB3



# 04PPC2



# 04PPC3

