



**Universidad de Valladolid**

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,  
Agronómica y de la Bioenergía**

**Campus de Soria**

**MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

### ***EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE OXIGENACIÓN DE CEPAS AUTÓCTONAS DE MICROALGAS Y APLICACIÓN EN PROCESOS DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES***

~~~~~

**AUTOR:** FELIX GONZALO IBRAHIM

**DEPARTAMENTO:** INGENIERÍA QUÍMICA Y  
TECNOLOGÍAS DE MEDIO AMBIENTE

**TUTORES:** IGNACIO DE GODOS CRESPO  
JOSÉ ÁNGEL MIGUEL ROMERA

**SORIA, JULIO DE 2018**





**Universidad de Valladolid**



## **AUTORIZACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER**

D. IGNACIO DE GODOS profesor del departamento de ingeniería química y tecnologías de medio ambiente como director del TFM titulado: “Evaluación del potencial de oxigenación de cepas autóctonas de microalgas y aplicación en procesos de depuración de aguas residuales” y presentado por el alumno D. FELIX GONZALO IBRAHIM,

Da el Vº. Bº. y autoriza la presentación de este, considerando que cumple las condiciones exigibles para su presentación y defensa ante un tribunal.

Soria, 5 de julio de 2018

El director del TFM, Ignacio de Godos.



## TRABAJO FIN DE MÁSTER

“Evaluación del potencial de oxigenación de cepas autóctonas de microalgas y aplicación en procesos de depuración de aguas residuales”.

### RESUMEN

Este trabajo fin de máster es un estudio sobre el potencial de depuración de aguas residuales usando microalgas. Tratándose de un sistema de depuración basado en el crecimiento de organismos fotosintéticos, la investigación se ha centrado en el estudio de la variable principal que determina el proceso, la intensidad de luz. Inicialmente, se evaluaron las velocidades de crecimiento de una cepa de microalga extraídas de un entorno natural utilizando un medio mineral (*Bold's Basal Medium*) a diferentes niveles de intensidad de luz. Este ensayo demostró una cinética de saturación respecto a la variable de intensidad de luz. El mismo ensayo fue replicado usando aguas residuales con similares resultados. Dado que el efecto depurador de las microalgas consiste en una oxigenación del medio en un sistema operado en continuo, también se ensayó el proceso en un fotobiorreactor cerrado, a temperatura constante y con una alimentación diaria con agua residual urbana de una pequeña aglomeración menor a 2.000 h-e. Las microalgas producidas durante este ensayo se usaron para medir el potencial de producción de oxígeno a diferentes niveles de iluminación. Los resultados fueron comparados con uno de los modelos de respuesta cinética validados para reacciones bioquímicas y crecimiento microbiano encontrándose una típica respuesta de limitación, saturación e inhibición. Para completar el estudio se evaluaron los rendimientos de eliminación de indicadores de contaminación (materia orgánica, nitrógeno y fósforo) durante el proceso en continuo, cumpliendo las normativas de vertido de aguas residuales.

**Palabras Clave:** microalgas, agua residual urbana, fotobiorreactor, intensidad de luz, oxigenación biológica.

### ABSTRACT

This master's degree project is a study on the wastewater treatment potential using microalgae. In the case of a depuration system based on the growth of photosynthetic organisms, research has focused on the study of the main variable that determines the process, light intensity. Initially, the growth rates of a microalgae strain extracted from a natural environment using a mineral medium (Bold's Basal Medium) at different light intensity levels were evaluated. This test showed a saturation kinetics related to the light intensity variable. The same test was replicated using wastewater with similar results. Since the microalgae purifying effect consists on oxygenation of the medium in a continuous operated system, the process was also tested in a closed photobioreactor, at a constant temperature and daily feed with urban waste water from a small agglomeration of less than 2,000. he. The microalgae produced during this test were used to measure the oxygen production potential at different levels of illumination. The results were compared with one of the validated kinetic response models for biochemical reactions and microbial growth, finding a typical response of limitation, saturation and inhibition. To complete the study, the elimination yield of pollution indicators (organic matter, nitrogen and phosphorus) during the continuous process were evaluated, complying with the rules of wastewater discharge.

**Keywords:** microalgae, wastewater, photobioreactor, light intensity, biological oxygenation.

## INDICE

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                                                                            | 3  |
| 1.1. Justificación y objetivos del trabajo .....                                                                 | 3  |
| 1.2. Estado del arte de la depuración de aguas residuales con microalgas.....                                    | 4  |
| 1.3. Marco normativo .....                                                                                       | 5  |
| 2. OBJETIVO .....                                                                                                | 7  |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                    | 8  |
| 3.1. Microalgas.....                                                                                             | 9  |
| 3.2. Caracterización de fuente de iluminación .....                                                              | 9  |
| 3.3. Estudio del crecimiento Algal en medio mineral .....                                                        | 10 |
| 3.3.1. Bold's Basal Medium .....                                                                                 | 10 |
| 3.3.2. Métodos de determinación del crecimiento de las microalgas. ....                                          | 10 |
| 3.4. Estudio del crecimiento Algal en agua residual .....                                                        | 11 |
| 3.4.1. Agua residual EDAR de Medinaceli.....                                                                     | 11 |
| 3.4.2. Métodos de determinación del crecimiento de las microalgas .....                                          | 12 |
| 3.5. Estudio de las condiciones óptimas en Fotobiorreactor para depuración de agua residual con microalgas ..... | 12 |
| 3.5.1. Fotobiorreactor y condiciones de experimentación.....                                                     | 12 |
| 3.5.2. Métodos de determinación del potencial de oxigenación.....                                                | 14 |
| 3.5.3. Métodos de determinación de parámetros fisicoquímicos .....                                               | 15 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                                                                   | 16 |
| 4.1. Caracterización de fuente de luz .....                                                                      | 16 |
| 4.2. Crecimiento Algal en Bold's Basal Medium.....                                                               | 16 |
| 4.3. Crecimiento Algal en Agua residual urbana.....                                                              | 18 |
| 4.4. Evaluación del potencial de oxigenación por energía aplicada.....                                           | 21 |
| 4.5. Evaluación del potencial de oxigenación a diferentes pH .....                                               | 22 |
| 4.6. Rendimientos Fotobiorreactor para depuración aguas residuales .....                                         | 23 |
| 5. CONCLUSIONES.....                                                                                             | 26 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                            | 27 |
| INDICE FIGURAS .....                                                                                             | 29 |
| INDICE TABLAS .....                                                                                              | 31 |
| ACRÓNIMOS .....                                                                                                  | 33 |
| ANEXOS.....                                                                                                      | 34 |

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Justificación y objetivos del trabajo

Disponer de agua de calidad es esencial para la salud humana, la protección del medio ambiente y el desarrollo económico. Por ello, la depuración de las aguas residuales se convierte en una necesidad ineludible y en una responsabilidad de todos los ciudadanos y las administraciones públicas.

Durante las actividades humanas se generan inevitablemente aguas residuales. Los principales focos de emisión de estas aguas contaminadas son los núcleos urbanos, zonas industriales e instalaciones de producción animal (granjas). Por depuración se entiende las medidas destinadas a reducir el contenido de contaminantes presentes hasta alcanzar niveles compatibles con el vertido en cuerpos de agua naturales.

Por otro lado, el ser humano se enfrenta con unos desafíos ambientales para satisfacer la gran demanda de energía [1]. Es bien conocido que el uso de combustibles fósiles conduce a un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero que afectan al calentamiento global y a su clima. Se preveía que el consumo de energía primaria del mundo aumentaría un 37% entre 2013 y 2035 [2]. Por lo tanto, es crucial encontrar combustibles renovables para reemplazar los fósiles tradicionales y que los procesos sean más eficientes energéticamente.

Las tecnologías de depuración de aguas residuales urbanas convencionales son las que se encuentran hoy en día en cualquier instalación de depuración. En la mayor parte de estos sistemas se incluyen sistemas basados en el crecimiento de microorganismos (bacterias) que consumen materia orgánica, nitrógeno, fósforo y oxígeno suministrado mediante aireación. Este último proceso demanda una gran cantidad de energía eléctrica.

Existen otro tipo de tecnologías no convencionales o ecológicas, basadas en procesos naturales de autodepuración que presentan una opción para el tratamiento de los efluentes urbanos. Las tecnologías que disponen estas características se conocen bajo el nombre genérico de "Tecnologías no convencionales de bajo coste".

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en microalgas constituyen una alternativa tecnológica para plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales (EDAR) que ha despertado un creciente interés científico en los últimos años [3].



Figura 1. EDAR el Torno, Chiclana de la Frontera. Proyecto ALL-GAS.

Estos tratamientos se centran en la acción de microalgas consiguiendo resultados óptimos de eliminación de microorganismos patógenos y en la disminución de la carga orgánica de aguas

residuales. En las últimas investigaciones realizadas se puede observar que, además de la depuración, existen otras aplicaciones para las microalgas principalmente de carácter energético como la obtención de subproductos como biodiésel o biocombustibles como bioetanol, biometano y biohidrógeno. La integración del proceso de depuración de aguas con producción de energía se propuso como sistema alternativo en la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, hoy en día el número de instalaciones a escala real es aún muy bajo con unas pocas unidades demostración. La mayor parte de estas unidades están localizadas en zonas de alta insolación que favorecen el crecimiento de las microalgas.

Por otra parte, las microalgas durante su crecimiento favorecen la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> por biomitigación biológica, lo cual es relevante considerando que el tratamiento convencional de depuración de aguas residuales urbanas genera casi 45 millones de toneladas de gases de efecto invernadero cada año [4].

## 1.2. Estado del arte de la depuración de aguas residuales con microalgas

Las aguas residuales urbanas contienen poblaciones de microalgas que dependen de las condiciones ambientales y de su procedencia. El establecer condiciones idóneas para su desarrollo como la luz, los nutrientes, turbulencia y el balance favorable de CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, permite su crecimiento y su uso para el proceso de depuración de aguas residuales [5].

Además de para el tratamiento de las aguas residuales, las microalgas pueden ser utilizadas para el secuestro de dióxido de carbono a través de inyecciones de CO<sub>2</sub> para garantizar una productividad de biomasa óptima y un pH constante [6]. Aunque en comparación con el proceso convencional de lodo activado, éste proceso requiere tiempos de retención hidráulica más largos que deberían optimizarse [7].

Otra manera, es utilizar el consorcio de microalgas y microalgas-bacterias. Se puede aplicar con éxito para el tratamiento de aguas residuales ricas en nutrientes, como aguas residuales agroindustriales, aguas residuales municipales, aguas residuales farmacéuticas y aguas residuales de tintes textiles por rutas de biosorción o bioconversión [8].

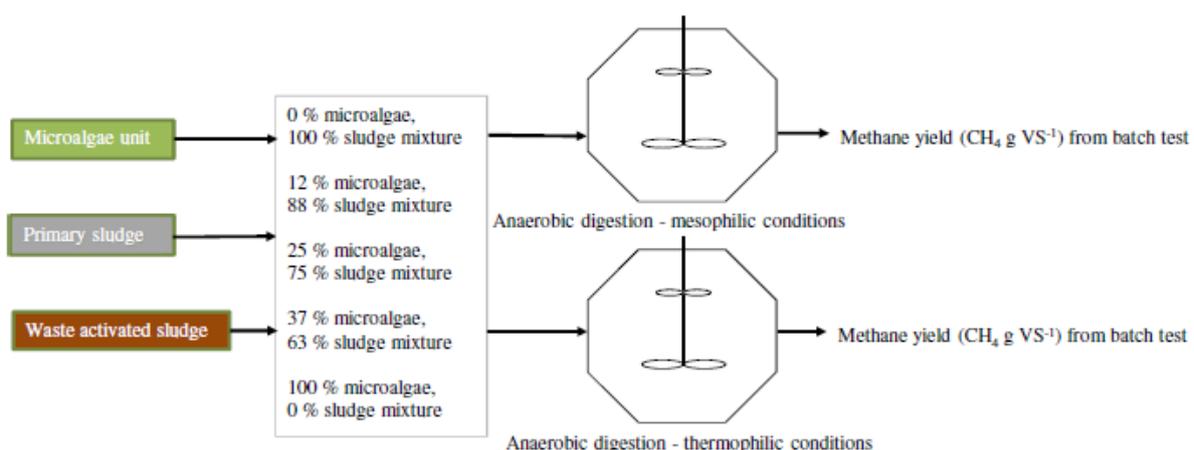


Figura 2. Esquema digestión algas con lodos de EDAR.

Otra forma, es la integración de microalgas como tratamiento terciario en los sistemas de lodo activado, es una solución prometedora y factible para recuperar energía y nutrientes de los desechos, para mejorar los rendimientos de las plantas de tratamiento de aguas residuales [9].

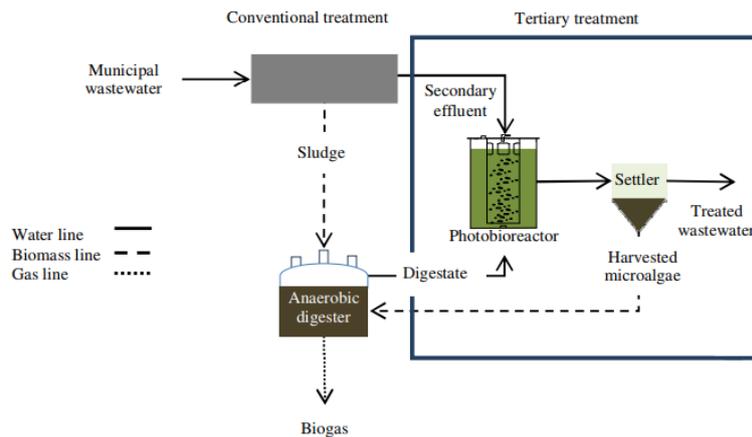


Figura 3. Esquema digestión anaerobia de algas.

El cultivo de microalgas en aguas residuales puede integrarse con procesos de generación de bioenergía. Estos microorganismos de crecimiento rápido, que pueden producir una cantidad equivalente de biodiesel por unidad de área de 7 a 31 veces mayor que los cultivos energéticos terrestres [10] y, por lo tanto, se consideran los recursos alternativos más prometedores para la producción de biocombustibles debido también a los problemas propios de la utilización de cultivos vegetales (aumento de precios y competencia de alimentos) [11]. Y comparando el ACV (análisis de ciclo de vida) en el proceso de producción de biodiesel de algas cultivadas en aguas residuales y agua dulce, las cultivadas con AR requieren menos energía [12].

Otra posibilidad es usar la biomasa como sustrato para la producción de biogás junto con los lodos producidos durante la depuración de aguas residuales. Los resultados de la co-digestión con microalgas tanto húmedas como secas con lodos de EDAR son que aumenta el potencial de metano bioquímico (BMP) en comparación con la digestión de aguas residuales del lodo en condiciones mesofílicas [13].

La implementación de esta tecnología de bajo coste y alta sostenibilidad medioambiental depende en gran medida de las tasas de actividad fotosintética, por lo que hay un fuerte impacto de la disponibilidad luz que a su vez depende de la ubicación. En este sentido, este trabajo tiene por objetivo estudiar los rendimientos tanto de generación de biomasa como de producción de  $O_2$  a diferentes niveles de intensidad de luz. De esta forma se conocerán los límites y el potencial real bajo distintas condiciones.

### 1.3. Marco normativo

El agua es un recurso, además de un bien público, un bien económico y un bien común. Desde el enfoque de los derechos humanos, el acceso básico al agua, así como el saneamiento, ha sido reconocido como un derecho humano fundamental.

A nivel europeo, los principios fundamentales de la política ambiental en materia de aguas de la Unión Europea son la conservación, protección y mejora de la calidad del agua así como la utilización prudente y racional de los recursos naturales (Artículo 130R del Tratado de la Unión Europea).

La Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991 y en su versión modificada por la Directiva 98/15/CE de la Comisión, de 27 de febrero de 1998, es una de las piedras angulares de la política comunitaria de aguas que tiene por objeto proteger el medio ambiente de los efectos adversos de los vertidos de aguas residuales urbanas.

En diciembre de 1998 se finalizaba el plazo para que los Estados miembros garantizaran que todas las aglomeraciones de más de 10.000 e-h cuyos efluentes que vertían en zonas sensibles se depurasen y en 31 de diciembre de 2005, terminaba el plazo para que todas las aglomeraciones de entre 2.000 y 10.000 e-h que viertan su efluente en una zona sensible o en su zona de captación dispusieran de un sistema colector y de tratamiento secundario o tratamiento adecuado.

A nivel estatal, el referente es el Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, y del Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo de este Real Decreto-Ley, modificado por el Real Decreto 2116/1998, establecía que antes del 1 de enero del año 2006, todas las aglomeraciones urbanas de más de 2.000 habitantes equivalentes debían contar con un tratamiento secundario de sus aguas residuales y, para aquellas aglomeraciones de menos de 2.000 habitantes equivalentes, con un tratamiento adecuado de las mismas.

Para la consecución de dichos objetivos se han seguido diferentes estrategias desarrollando un Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (1995–2005) con un horizonte puesto en el 31 de diciembre 2005, fecha clave señalada por la normativa para alcanzar la conformidad de los sistemas de depuración de las aglomeraciones urbanas.

La ejecución de este Plan ha permitido que España alcance un nivel de conformidad del 77%, que se elevará en los dos próximos años al 91% si se contabilizan las infraestructuras que estaban en construcción.

Durante estos diez años de vigencia del Primer Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 1995-2005, se ha producido un cambio relevante, derivado de la aprobación y transposición de la Directiva Marco y de la administración pública del Agua en el año 2000, que aporta un nuevo enfoque integrado de la política de aguas.

Posteriormente, se elabora el segundo Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015, que intenta conseguir los objetivos no alcanzados por el primer Plan, así como las nuevas necesidades planteadas por la Directiva Marco del Agua.

El segundo Plan Nacional de Calidad de las Aguas forma parte de un conjunto de medidas para el cumplimiento del Real Decreto-Ley 11/1995 y que pretenden contribuir a alcanzar el buen estado ecológico de las masas de agua que la Directiva Marco del Agua estimaba para el año 2015, con objeto de conseguir un desarrollo socioeconómico equilibrado y ambientalmente sostenible.

Uno de los retos de este nuevo Plan, es idear sistemas eficaces de depuración y redes de saneamiento que conduzcan todas las aguas residuales a las depuradoras, en particular para muchas aglomeraciones urbanas de pequeño tamaño (< 2.000 habitantes equivalentes).

Aunque el porcentaje en carga contaminante de este conjunto de poblaciones es pequeño en comparación con las grandes aglomeraciones urbanas, su elevado número supone uno de los retos más importantes del nuevo Plan Nacional de Calidad de las Aguas.

## 2. OBJETIVO

El objetivo central de la investigación es estudiar el potencial y los límites de los cultivos de microalgas para la depuración de aguas residuales, centrándose en el efecto de la principal variable que determina el rendimiento: la intensidad de luz. La investigación se ha centrado en los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la relación del crecimiento microalgal con respecto a la intensidad de luz aplicada a diferentes alícuotas en un medio *Bold's Basal*.
- Comparar el estudio anterior con el medio de agua residual urbana de una aglomeración urbana con menos de 2.000 h-e.
- Comprender el funcionamiento y los rendimientos de depuración del agua residual del fotobiorreactor en continuo aplicando diferentes intensidades de luz durante ciclos de 12 horas de iluminación y 12 horas de oscuridad.
- Determinar el óptimo de producción de oxígeno a diferentes intensidades de luz, medidas como diferentes cantidades de número de moles de fotones por unidad de tiempo y superficie que alcanzan en el fotobiorreactor.
- Determinar el óptimo de pH para la producción de oxígeno a una concentración determinada y al óptimo de número de fotones aplicado.
- Evaluar el potencial de depuración de aguas residuales a distintas condiciones de energía solar y pH para el estudio de las condiciones de las plantas pilotos al escalado a una planta real.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio de la evaluación del potencial de oxigenación de las microalgas se han realizado diferentes operaciones, con distintos medios, instrumentación y equipos de medida.

A continuación, se presenta un flujograma donde se pueden observar las distintas operaciones de la investigación.

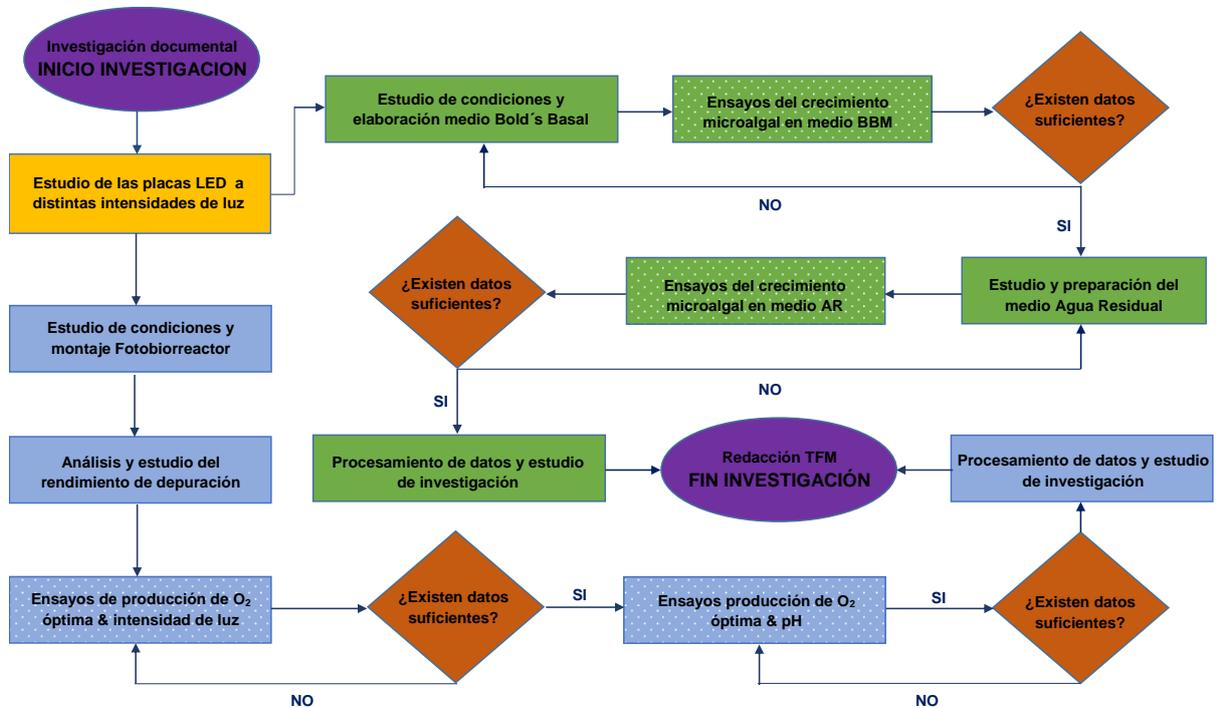


Figura 4. Flujograma del trabajo de investigación del TFM.

Existen tres tipos de métodos para el de cultivo microalgas, dependiendo de cómo opere el sistema:

- **Cultivos discontinuos (*Batch*):** En estos cultivos las microalgas solo reciben aporte inicial de nutrientes y pasan por distintas fases de crecimiento (latencia, exponencial y estacionaria). La evolución de la concentración se ajusta a un modelo exponencial de crecimiento [14]. Se producen cambios fisiológicos en las microalgas a medida que transcurre el tiempo de cultivo. En la presente investigación se ha realizado este cultivo para estudiar las cinéticas de crecimiento y los parámetros de luz que inciden en el crecimiento celular.
- **Cultivo semi-continuo:** En este tipo de cultivo, donde parte del volumen se recoge para su utilización, generalmente al final de la fase exponencial, la cantidad que se retira se reemplaza con un medio de cultivo fresco.
- **Cultivo continuo:** En estos cultivos las microalgas están en fase exponencial de crecimiento (*steady-state*) durante largos periodos de tiempo. Para ello, se añade continuamente nutrientes con un cultivo fresco en la misma medida que son retirados del medio para mantener los parámetros de crecimiento y de población celular a nivel constante.

En este trabajo de investigación se han utilizado los siguientes métodos:

- Estudio de crecimiento algal en medio *Bold's Basal* y en medio Agua Residual que el medio de cultivo ha sido discontinuo o *batch*.
- Estudio de potencial de oxigenación en fotobiorreactor donde el medio de cultivo ha sido en continuo.

### 3.1. Microalgas

Las microalgas que se cultivan para tratamiento de las aguas residuales se seleccionan cuidadosamente en especies tanto de agua dulce como de agua salada. Una cepa robusta tendrá una mayor tolerancia a las condiciones ambientales y tendrá una menor susceptibilidad a los depredadores [15]. Esto asegura que las algas seleccionadas tienen mayores posibilidades de adaptarse y sobrevivir a las duras condiciones del agua residual. Las 8 microalgas más tolerantes son: *Euglena*, *Oscillatoria*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Nitzschia*, *Navicula* y *Stigeoclonium*. *Scenedesmus sp.* y *Chlorella sp.* son muy comunes en todo tipo de agua dulce y juegan un papel importante como productores primarios que contribuyen a la purificación de las aguas eutróficas [16].

En este estudio se seleccionó un consorcio de microalgas autóctonas extraídas de un ambiente natural, que se ubica en la presa de Buitrago (Soria). De esta forma se evita la intrusión de especies foráneas en el medio ambiente. El cultivo de las microalgas para esta investigación se llevó a cabo en un medio de agua residual. A partir de estas cepas, se inocularon los ensayos posteriores.

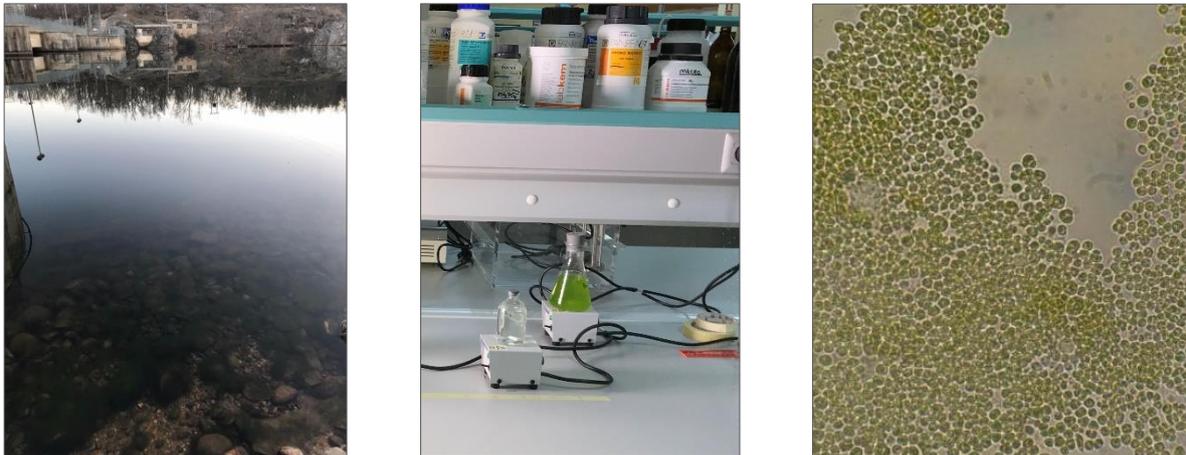


Figura 5, Figura 6, Figura 7. Presa de Buitrago, cepa autóctona de microalga y vista al microscopio.

Existen una amplia variedad de algas que se pueden utilizar, por lo que la diversidad no es un problema y es posible replicar a diferentes escalas. La selección de cepas es de suma importancia considerando que las aguas residuales son diferentes en cada entorno y un medio complicado para sobrevivir [17]. El color de las aguas residuales también es uno de los factores limitantes que limitan su crecimiento. La cepa seleccionada debe sobrevivir bajo unas condiciones de luz limitadas mientras se degradan los compuestos responsables de generar el color y, al mismo tiempo, resistir a las concentraciones de compuestos o elementos que podrían ser tóxicos (por ejemplo  $\text{NH}_3$  o metales pesados).

### 3.2. Caracterización de fuente de iluminación

En el estudio de la energía aplicada para evaluar el potencial de oxigenación de las microalgas se han utilizado dos placas LED con un regulador de 3 potencias: 0, 1 y 2. El equipo que se ha utilizado para la medición es el LI-250A LI-COR. Se adjunta datos del equipo en el Anexo I.

Las mediciones de luz de la placa LED han sido realizadas cada 5 cm desde 5 hasta 100 cm, con 2 medidas tomadas por cada distancia sobre 4 puntos de la placa LED (ver Fig. 10). Estas medidas se han repetido para cada potencia 0, 1 y 2. Los cuatro puntos medidos han sido los puntos 1, 2, 3 y 4.

La elección de estos puntos viene marcada por el hecho de que las mediciones en los puntos 3 y 5 eran similares, igual que en los puntos 2 y 6, puntos 3 y 7, puntos 4 y 8 y puntos 3 y 9.

Se realizaron varias medidas a distintas distancias que demostraban la igualdad de medición en estos puntos, se adjuntan en el Anexo II.

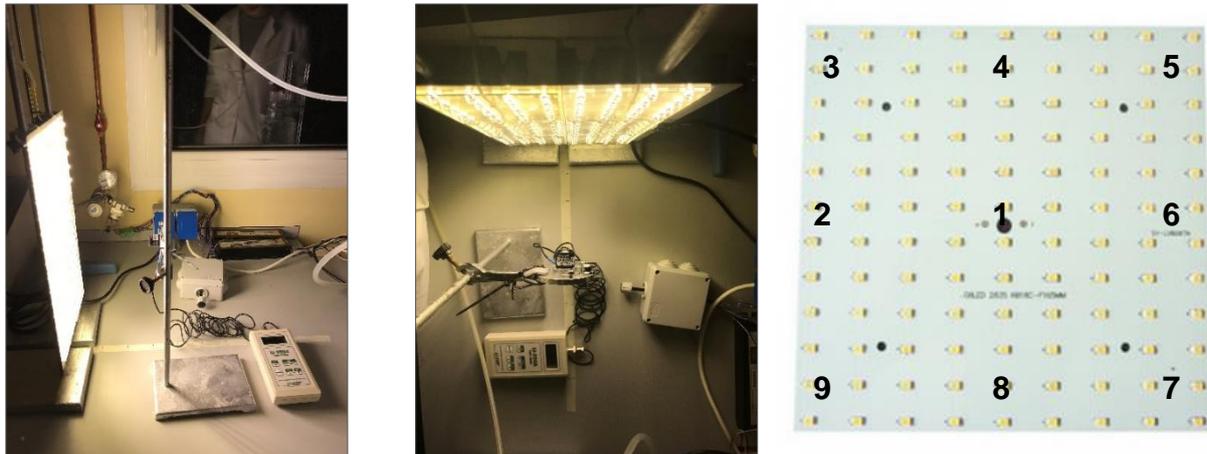


Figura 8, Figura 9, Figura 10. Toma de medidas de intensidad de luz y puntos medición LED.

El estudio de la estrategia de iluminación es parte fundamental del estudio del crecimiento de las microalgas, ya que podría evitar la fotoinhibición en la fase de cultivo inicial y la ineficiencia de la intensidad de luz por insuficiencia en la última fase de cultivo [18].

### 3.3. Estudio del crecimiento Algal en medio mineral

Las microalgas son principalmente organismos fotoautótrofos, es decir, obtienen la energía de la luz solar y se desarrollan a partir de materia inorgánica. En la actual investigación se ha utilizado medio mineral *Bold's Basal Medium*.

#### 3.3.1. Bold's Basal Medium

Para determinar el crecimiento de las microalgas se determinó un medio que contiene los nutrientes inorgánicos suficientes para que se desarrolle el crecimiento celular para los ensayos a distintas intensidades de luz de manera fotoautótrofa. Se puede ver en el Anexo III.

#### 3.3.2. Métodos de determinación del crecimiento de las microalgas.

La metodología utilizada para determinar el crecimiento de las microalgas fue el cultivo en discontinuo o tipo *batch* en el medio *Bold's Basal*.

Se determinaron 5 alícuotas compuestas por 95 ml de *Bold's Basal Medium* y 5 ml de microalga cultivada anteriormente. El volumen total de cada alícuota era de 100 ml en constante agitación.

La placa LED, fuente de energía, estaba programada para dar 12 horas de luz a potencia 0 y 12 horas de sin luz. Las alícuotas se distribuyeron a diferentes distancias de la placa LED. Las distancias e intensidades de luz para cada alícuota de los ensayos fueron las siguientes:

| Muestra                                                            | M1     | M2     | M3     | M4    | M5    |
|--------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Distancia (cm)                                                     | 7,5    | 15,0   | 37,5   | 48,0  | 85,0  |
| LED<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 400,20 | 215,30 | 100,10 | 56,77 | 26,44 |

Tabla 1. Datos muestras ensayo BBM.

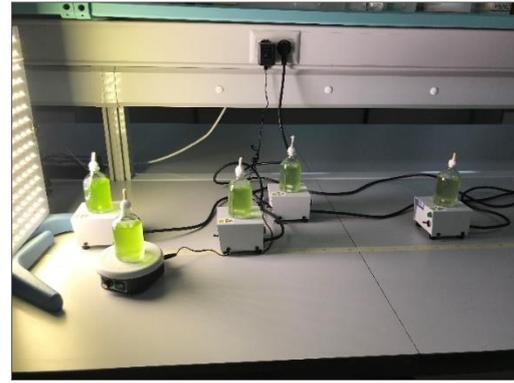


Figura 11, Figura 12. Ensayos *batch* de microalgas.

La determinación del crecimiento microalgal se realizó por Densidad Óptica (DO) mediante espectrofotometría a absorbancias de 550 nm y de 680 nm. Las mediciones de cada alícuota, en cubetas de 2,5 ml (ver Fig. 13), se llevaron a cabo dos veces al día y por duplicado. Los datos se pueden observar en el Anexo IV.

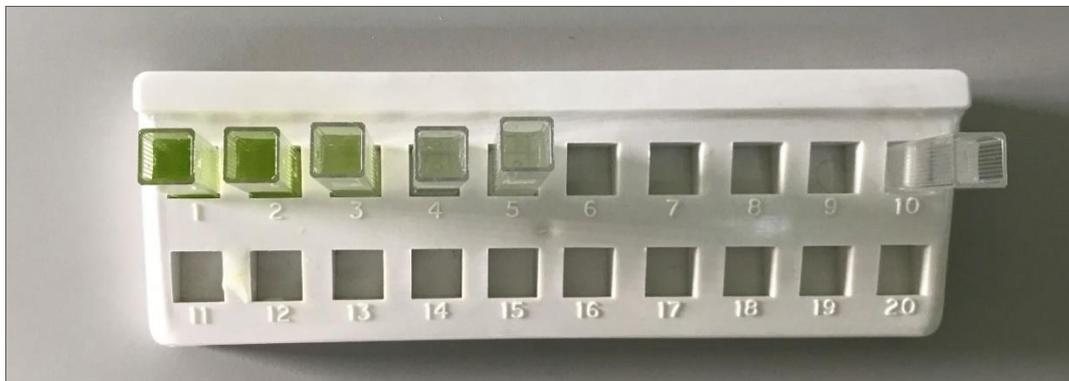


Figura 13. Cubetas de medición de absorbancia.

Posteriormente se convirtieron a concentración mediante la determinación de Sólidos Totales en Suspensión (SST) y la curva de dilución de las microalgas de las Absorbancias de 550 y 680 nm que pueden observar en el Anexo V.

Los datos experimentales se correlacionaron con uno de los modelos más utilizados para describir el crecimiento de una población (modelo de Verlhust,, Ecuación (1)), ajustándose los datos experimentales a modelos mediante método de mínimos cuadrados. Este ajuste permite determinar las tasas específicas de crecimiento ( $\mu$ ,  $d^{-1}$ ) de los microorganismos en cada ensayo. Para la determinación de la tasa de crecimiento se utilizó el complemento Solver de Excel.

$$X = \frac{X_m \cdot X_0 \cdot e^{\mu \cdot t}}{X_m - X_0 + X_0 \cdot e^{\mu \cdot t}} \quad (1)$$

### 3.4. Estudio del crecimiento Algal en agua residual

En la actual investigación se ha utilizado un agua residual urbana real de una aglomeración menor de 2.000 e-h con baja carga industrial.

#### 3.4.1. Agua residual EDAR de Medinaceli

La EDAR de Medinaceli comprende la depuración de los núcleos de Medinaceli Villa y Medinaceli Estación hasta su vertido al río Jalón.

El agua residual se ha elegido en este núcleo por ser pequeña aglomeración, la población equivalente se sitúa en 1.615 e-h en invierno y 1.985 e-h en verano. Los vertidos en Medinaceli Villa son vertidos puntuales a la red de saneamiento, procedentes de la limpieza en restaurantes y hostelería y a los vertidos directos de aguas fecales. Estos vertidos se caracterizan por la elevada carga contaminante y la escasa continuidad de caudales, registrándose puntas de caudal muy frecuentes.

El vertido generado en Medinaceli Estación se asemeja a un vertido típico de origen doméstico mezclado con vertidos procedentes de los restaurantes, cafeterías y hoteles que provocan un aumento de los parámetros de contaminación. Se adjunta una descripción de las instalaciones de la EDAR en el Anexo VI.

Los análisis que se obtienen de la entrada de la EDAR de Medinaceli son los siguientes:

| Fecha/Parámetros | DQO (mg/L) | DBO <sub>5</sub> (mg/L) | SST (mg/L) | NTK (mg/L) | Pt (mg/L) |
|------------------|------------|-------------------------|------------|------------|-----------|
| 18/01/2018       | 122 ± 3    | 70 ± 3                  | 84 ± 2     | 12,0 ± 0,5 | 1,5 ± 0,3 |
| 21/02/2018       | 263 ± 3    | 138 ± 3                 | 614 ± 2    | 12,0 ± 0,5 | 1,1 ± 0,3 |
| 14/03/2018       | 56 ± 3     | 28 ± 3                  | 158 ± 2    | 10,0 ± 0,5 | 0,3 ± 0,3 |
| 11/04/2018       | 151 ± 3    | 89 ± 3                  | 348 ± 2    | 15,0 ± 0,5 | 1,6 ± 0,3 |
| 16/05/2018       | 252 ± 3    | 141 ± 3                 | 284 ± 2    | 21,0 ± 0,5 | 1,9 ± 0,3 |

Tabla 2. Datos parámetros EDAR Medinaceli.

En el tiempo que duró la investigación se recogió un volumen de 50 litros de AR para su tratamiento en el Fotobiorreactor.

### 3.4.2. Métodos de determinación del crecimiento de las microalgas

Para determinar el crecimiento microalgal con distintas intensidades de luz, se distribuyeron 5 alícuotas a diferentes distancias de la placa LED. La metodología utilizada para determinar el crecimiento de las microalgas consiste en el cultivo en discontinuo o tipo *batch*, al igual que el ensayo de Bold's Basal Medium.

Los datos se pueden observar en el Anexo VII y la curva de dilución de las microalgas a las Absorbancias de 550 y 680 nm en el Anexo VIII.

## 3.5. Estudio de las condiciones óptimas en Fotobiorreactor para depuración de agua residual con microalgas

Las microalgas se pueden utilizar para la producción de compuestos de alto valor, el tratamiento de aguas residuales, la mitigación de CO<sub>2</sub> y la producción de bioenergía. Para cada tipo de uso, se pueden utilizar diferentes tipos de fotobiorreactores, desde tubulares, a paneles planos y canales [19].

La eficiencia del Fotobiorreactor (PBR) afecta significativamente a la productividad de la biomasa de las microalgas [20]. El proceso de fotosíntesis de las microalgas requiere una irradiación óptima para lograr su máxima producción de biomasa. Las microalgas sufrirán una ligera inhibición por irradiación excesiva, mientras que la irradiación de luz insuficiente causará la disminución de la productividad de biomasa.

Para que la distribución del campo de luz en el PBR sea lo más eficiente, se han utilizado los datos del ensayo anterior para el diseño y optimización de la instalación de los equipos.

### 3.5.1. Fotobiorreactor y condiciones de experimentación

La metodología utilizada en el estudio de las microalgas con fotobiorreactor fue el cultivo en continuo con un volumen útil de 1,2 litros.

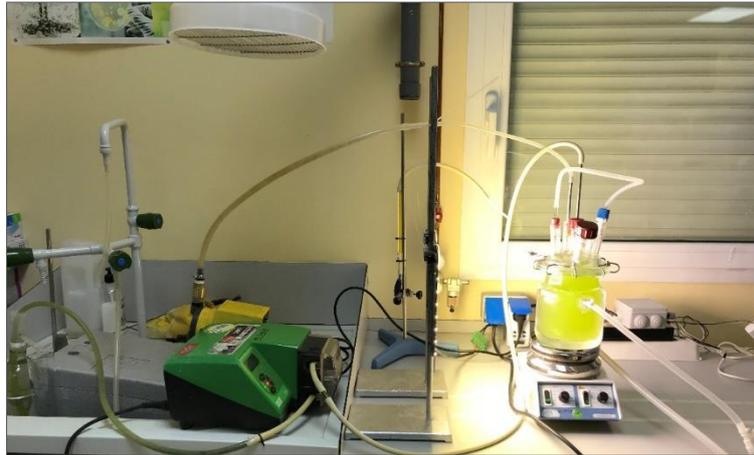


Figura 14. Instalación de depuración con Fotobiorreactor.

Las condiciones de experimentación han sido las siguientes:

### LUZ.

La luz es la fuente de energía para el desarrollo de las microalgas y supone el principal factor limitante en el desarrollo de los procesos biotecnológicos. Al disponer de los datos del ensayo del crecimiento algal con agua residual, la luz que se dispuso fue: intensidad 0, distancia 20 cm y  $234,2 \pm 0,2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . La frecuencia consistió en 2 cambios al día: 12 horas de luz y 12 horas sin luz comenzando a las 9:30 y finalizando a las 21:30.

### TEMPERATURA.

La temperatura del fotobiorreactor se ha mantenido constante a 20° C mediante un baño termostático. El Fotobiorreactor dispone de una camisa de agua para poder mantener la temperatura constante debido a que este parámetro afecta directamente a la respiración y a la fotorrespiración más que a la fotosíntesis. Existen microalgas adaptadas a bajas temperaturas que permiten altos rendimientos mientras los aumentos de temperatura en el rango de 20-30° C en otras cepas repercuten de forma positiva [21].

### AGITACIÓN.

El Fotobiorreactor se ha mantenido en agitación constante para mejorar las características, formar un medio homogéneo y proporcionar la misma energía recibida del LED.

### ALIMENTACIÓN.

La alimentación se ha realizado con una bomba dosificadora de diafragma LMI Milton Roy. Para mantener constante el tiempo de residencia hidráulico (TRH) del agua residual en el Fotobiorreactor, se realizó un estudio de caudal y se aportó un caudal de agua residual diario de 150-200 ml diarios con un temporizador con las siguientes frecuencias:

| <b>Hora (pm)</b>    | 0:00 | 11:00 | 13:00 | 17:00 | 19:00 | 21:00 |
|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Tiempo (min)</b> | 10   | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    |

Tabla 3. Tiempos de alimentación Fotobiorreactor.

Para obtener cultivos continuos, todos los factores de crecimiento deben mantenerse constantes. La densidad del cultivo se controla manteniendo una concentración constante.

El equipo que se utilizó para retirar el mismo volumen diario que el volumen de alimentación fue una bomba peristáltica con un caudal constante de 35 ml/min, Watson Marlow 520 serie ip31.

### EQUIPOS DE MEDICIÓN EN CONTINUO.

Los parámetros que se midieron en continuo en el periodo que el Fotobiorreactor estuvo en funcionamiento fueron el pH y el oxígeno disuelto (OD). El equipo que se utilizó fue el analizador multiparamétrico Consort c3010.

Las características de los equipos eléctricos utilizados en este punto se describen en el Anexo IX.

#### **3.5.2. Métodos de determinación del potencial de oxigenación**

En la determinación del estudio de la producción máxima de oxígeno se ha utilizado un equipo que dispone a volumen de 150 ml útiles y un encamisado de agua para poder trabajar a temperatura constante mediante un baño termostático.

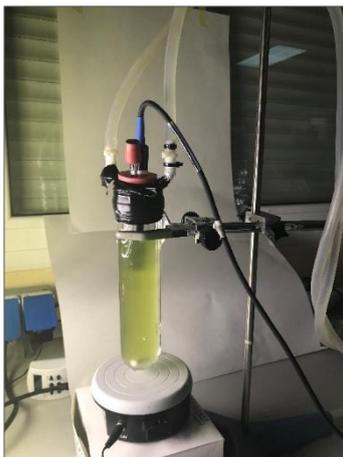


Figura 15, Figura 16. Equipo para ensayos de potencial de oxigenación.

El equipo de medición utilizado para las mediciones de pH y oxígeno disuelto ha sido el Consort c3010 con su almacenamiento de datos en el software Desert Disk.

### DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MÁXIMA DE OXÍGENO POR ENERGÍA APLICADA.

Se utilizaron 100 ml de microalgas del Fotobiorreactor para cada ensayo de producción de oxígeno con diferentes intensidades de luz del LED.

| Intensidad<br>LED<br>( $\mu\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) | 0  | 0  | 0   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    | 1    | 2    | 2    |
|----------------------------------------------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                                                                      | 54 | 74 | 105 | 132 | 224 | 380 | 515 | 643 | 924 | 1675 | 2728 | 3739 | 5875 |

Tabla 4. Intensidades de luz para producción máxima de oxígeno.

Para cada ensayo se determinó la ecuación de la línea de tendencia de los datos obtenidos.

Los datos se trataron mediante mínimos cuadrados y se estudiaron los siguientes modelos de crecimiento. Se pueden usar varios modelos para correlacionar los datos de fotosíntesis entre la tasa de crecimiento y la irradiación, la mayoría de ellos se basan en relaciones cinéticas enzimáticas, que consideran la luz como un nutriente equivalente a sustrato. El modelo Monod, Ecuación (2),  $P_{O_2}$  es la tasa de fotosíntesis,  $P_{O_2, \text{max}}$  es la máxima tasa de fotosíntesis, e  $I_k$  es la irradiancia constante o irradiancia necesaria para la mitad del máximo de la tasa de fotosíntesis en condiciones de cultivo específicas. Para tener en cuenta la fotoinhibición, se utiliza el modelo Haldane, Ecuación (3), en el que  $I_i$  es la irradiancia de la fotoinhibición [22].

$$P_{O_2} = \frac{P_{O_2, \text{max}} I}{I_k + I} \quad (2)$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{O_2, \max} I}{I_k + I + \frac{I^2}{I_i}} \quad (3)$$

Para la determinación del valor máximo de la tasa de crecimiento según modelo Haldane se utilizó el complemento Solver de Excel.

#### DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MÁXIMA DE OXÍGENO A DIFERENTES pH.

Se utilizó 100 ml de microalgas del fotobiorreactor para cada ensayo de producción de oxígeno a diferentes pH. Para este ensayo se utilizó el máximo de producción de oxígeno a una determinada energía aplicada del ensayo anterior: intensidad 1, distancia 35 cm y intensidad de luz igual a LED 380  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

|                   |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>pH ácidos</b>  | 1,14 | 2,43 | 3,76 | 4,25 | 4,73 | 5,20 | 5,76  | 6,42  | 6,46  | 6,89  | 7,30  |
| <b>pH básicos</b> | 7,30 | 8,09 | 8,40 | 9,14 | 9,65 | 9,74 | 10,85 | 11,22 | 11,66 | 11,91 | 12,04 |

Tabla 5. pH de los ensayos de producción máxima oxígeno.

Para cada ensayo se determinó la ecuación de la línea de tendencia de los datos obtenidos.

La modificación de pH se ha realizado con la adición de HCl 1M y NaOH 1M.

#### **3.5.3. Métodos de determinación de parámetros fisicoquímicos**

Los parámetros que se analizaron para el estudio de los rendimientos del tratamiento de las aguas residuales en fotobiorreactores fueron los siguientes:

- DQO, SST, Nitrógeno amoniacal y Fosforo ( $\text{PO}_4^{-3}$ ).

Las muestras que se analizaron para el estudio de los rendimientos del tratamiento de las aguas residuales con microalgas fueron las siguientes:

- Entrada (E), agua residual que se aportaba al fotobiorreactor.
- Salida (S), agua del rebose posterior a la decantación del vertido de salida del fotobiorreactor.
- Fotobiorreactor (F), agua residual y microalgas.

| <b>Fecha</b> | <b>Entrada</b>  | <b>Salida</b>   | <b>Fotobiorreactor</b> |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 09/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST, N y P             |
| 11/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST, N y P             |
| 14/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST, N y P             |
| 16/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST                    |
| 18/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST                    |
| 21/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST                    |
| 23/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST                    |
| 25/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST                    |
| 28/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST                    |
| 30/05/18     | DQO, SST, N y P | DQO, SST, N y P | SST                    |

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos analizados en Fotobiorreactor.

En el Anexo XV se adjuntan la metodología que se ha utilizado para la determinación de los parámetros de depuración del Fotobiorreactor.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización de fuente de luz

Los resultados del estudio de distintas intensidades de luz de la placa LED muestran la curva exponencial que relaciona distancia con intensidad de luz en  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ . Estos datos se pueden observar en la gráfica de las intensidades del punto 1.

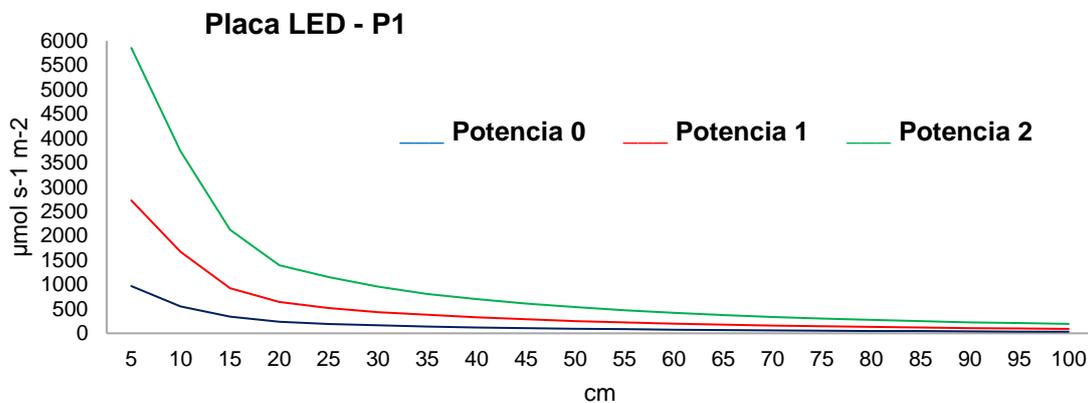


Figura 17. Gráfica de las intensidades de luz Punto 1 de la Placa LED

En el Anexo II se adjunta las gráficas de los puntos 2, 3 y 4.

### 4.2. Crecimiento Algal en Bold's Basal Medium

Las fases del crecimiento microalgal (ver Fig. 18), son las siguientes:

- Fase 1 Retardo o Lag: fase inicial de crecimiento lento o nulo que tiene lugar mientras los organismos se acostumbran al nuevo entorno.
- Fase 2 Aceleración transitoria: el inóculo comienza a crecer, seguido por una fase exponencial.
- Fase 3 Exponencial: fase de crecimiento a la máxima velocidad específica.
- Fase 4 Deceleración: tiene lugar cuando aparece un nutriente que puede ser limitante. Si el nutriente limitante llega en forma continua (como pasa con la luz en las microalgas) se observa una fase lineal.
- Fase 5 Estacionaria: las condiciones se vuelven tan limitantes que  $\mu$  baja hasta que  $\mu_{bruta}=m$  y por tanto  $\mu_{neta}=0$ .
- Fase 6 Muerte: comienza a haber muerte celular a un ritmo significativo.

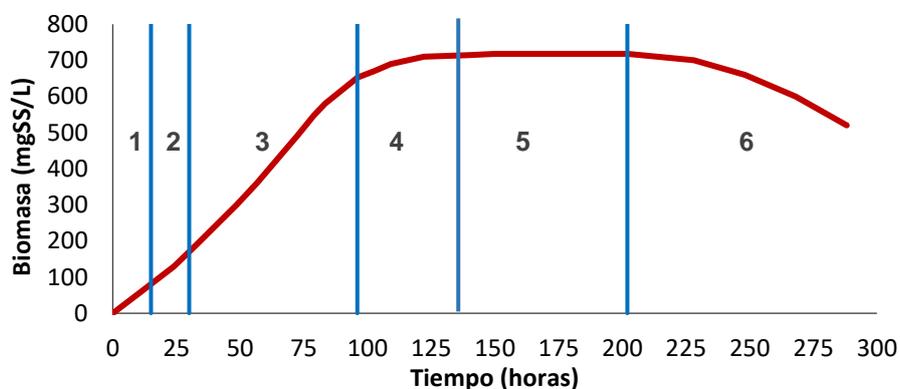


Figura 18. Fases del crecimiento microalgal.

En las gráficas de los modelos de crecimiento de las muestras de las microalgas en Bold's Basal Medium de Absorbancia 550 y 680 nm se pueden observar como a mayor intensidad de luz mayor crecimiento algal, expresado en tasa de crecimiento.

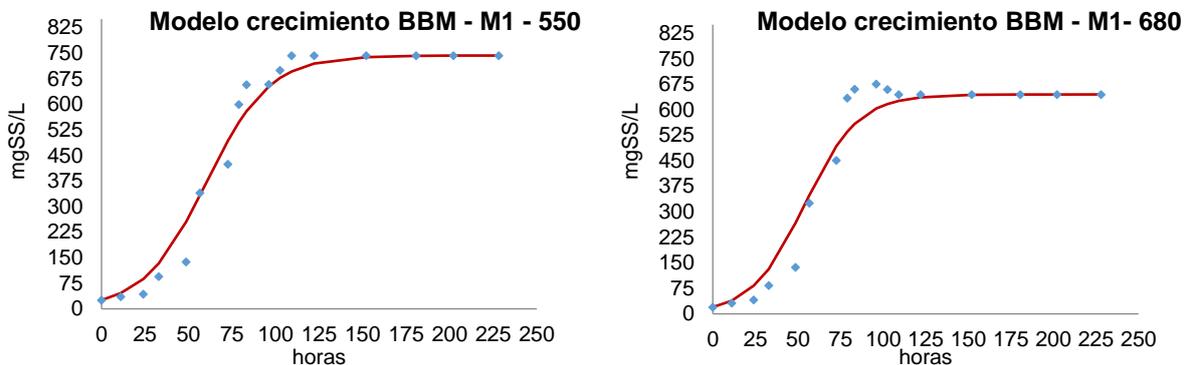


Figura 19. Gráficas modelo crecimiento BBM – M1.

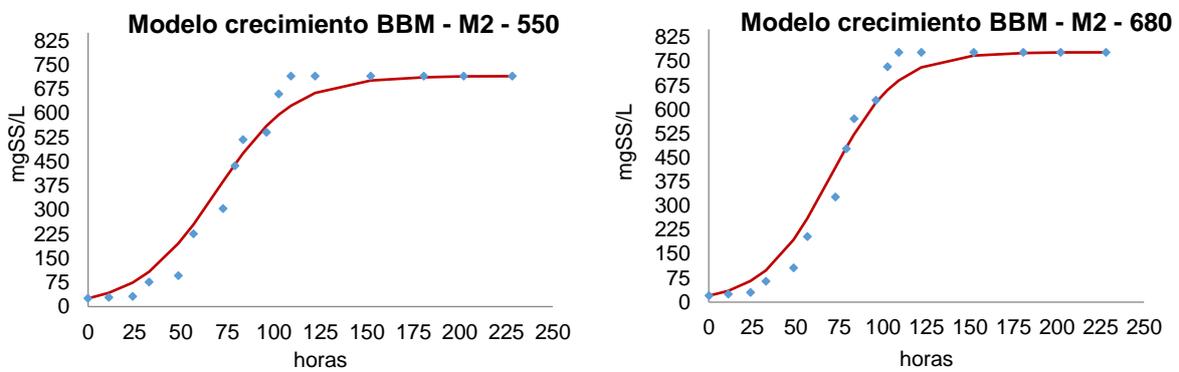


Figura 20. Gráficas modelo crecimiento BBM – M2.

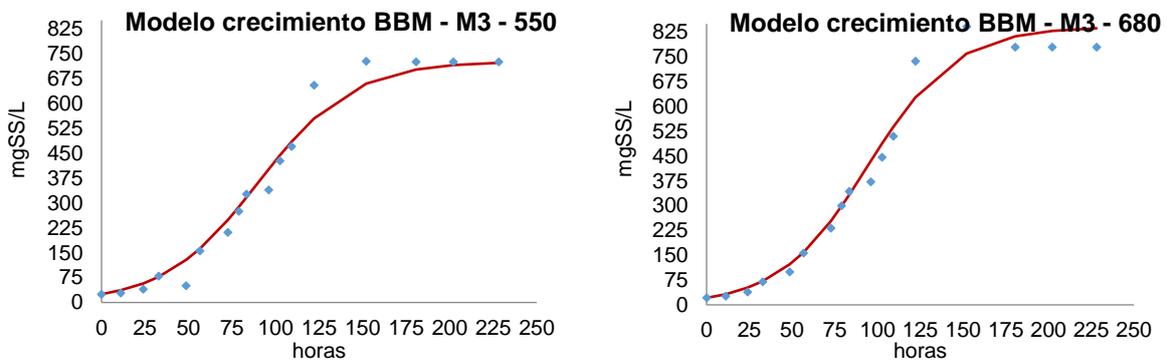


Figura 21. Gráficas modelo crecimiento BBM – M3.

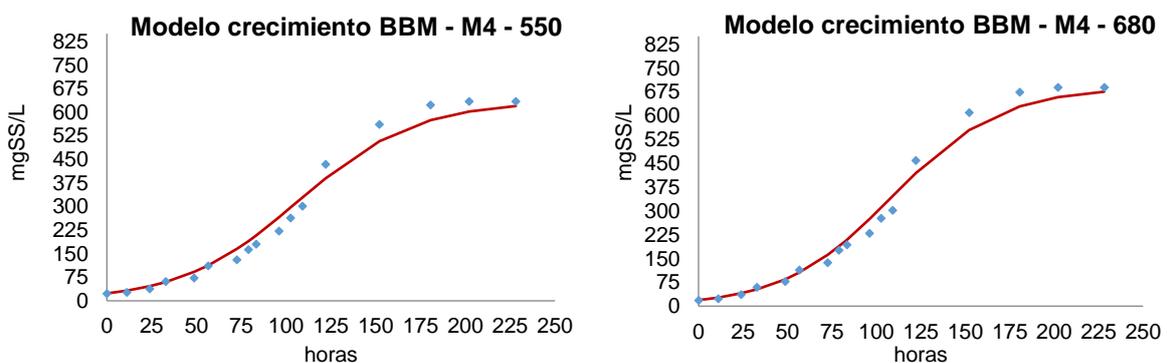


Figura 22. Gráficas modelo crecimiento BBM – M4.

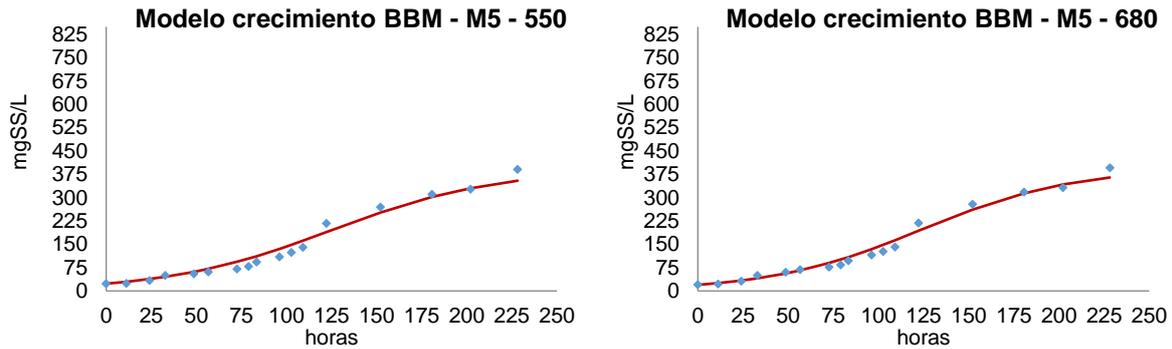


Figura 23. Gráficas modelo crecimiento BBM – M5.

En el modelo Verlhust de las gráficas de crecimiento de BBM se encuentra más atenuado la fase exponencial 3 en las muestras M1, M2 y M3 (ver Fig. 19, 20 y 21). Por otro lado, en las muestras M4 y M5 (ver Fig. 22 y 23) las gráficas finalizan en la fase 4 de deceleración, sin llegar a la fase muerte.

Los datos que se han utilizado para la realización de las gráficas de BBM de absorbancias de 550 nm se pueden ver en el Anexo X y para absorbancias de 680 nm en el Anexo XI.

Para comparar las 5 muestras se ha utilizado el tiempo de duplicación celular, ecuación (4).

$$x = x_0 \cdot e^{\mu t} \quad (4)$$

Considerando el tiempo en que la biomasa inicial se ha duplicado  $x(t)=2x_0$ , despejando el tiempo de duplicación  $t=\ln 2/\mu$  cada condición ensayada. En las gráficas de la Fig. 24, se puede observar como el crecimiento microalgal sucede en menos tiempo cuando la intensidad de luz recibida es mayor. Los datos se adjuntan en el Anexo XIV.

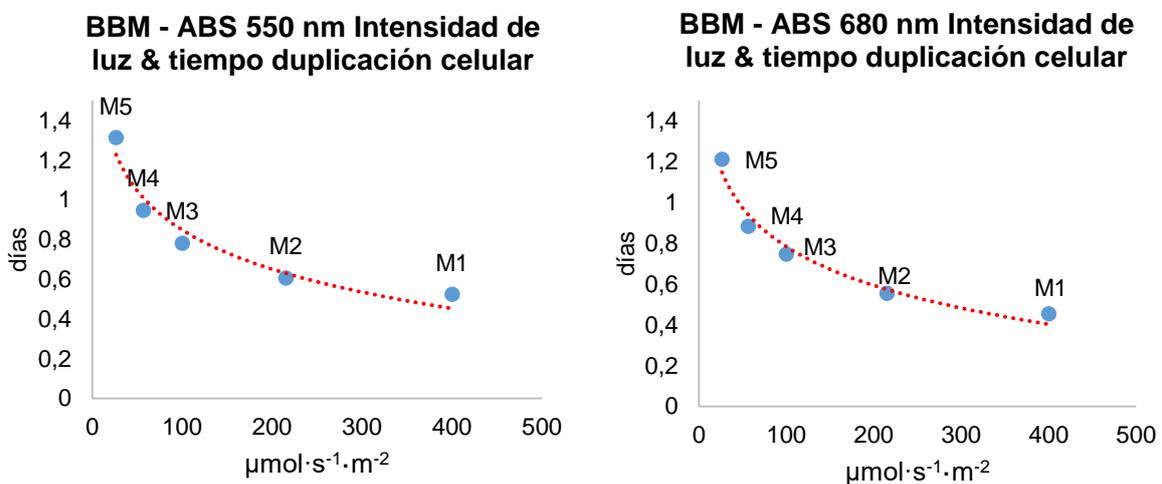


Figura 24. Gráficas de la relación Intensidad de Luz & tasa de crecimiento BBM.

### 4.3. Crecimiento Algal en Agua residual urbana

En las gráficas de los modelos de crecimiento de las muestras de las microalgas en medio de AR de Absorbancia 550 y 680 nm se pueden observar como a mayor intensidad de luz mayor crecimiento algal, expresado en tasa de crecimiento, pero de menor manera en comparación con el BBM debido a la falta de nutrientes.

Los datos para la realización de las gráficas de AR se pueden ver para absorbancias de 550 nm en el Anexo X y para absorbancias de 680 en el Anexo XI.

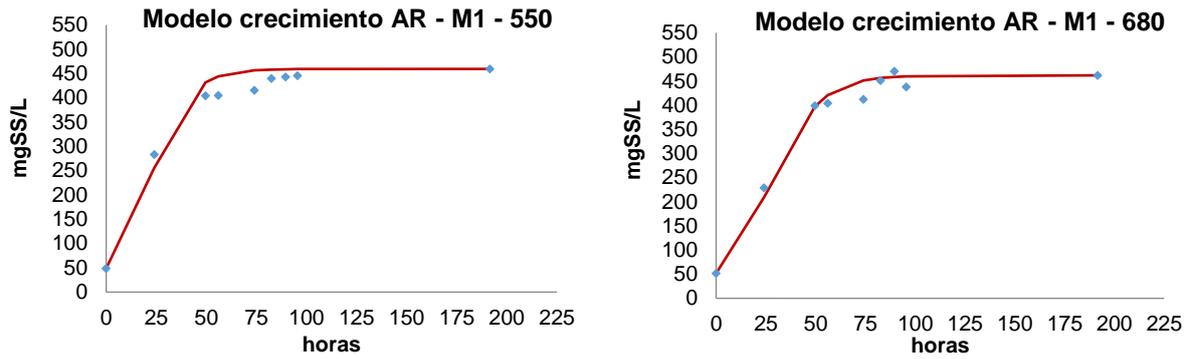


Figura 25. Gráficas modelo crecimiento AR – M1.

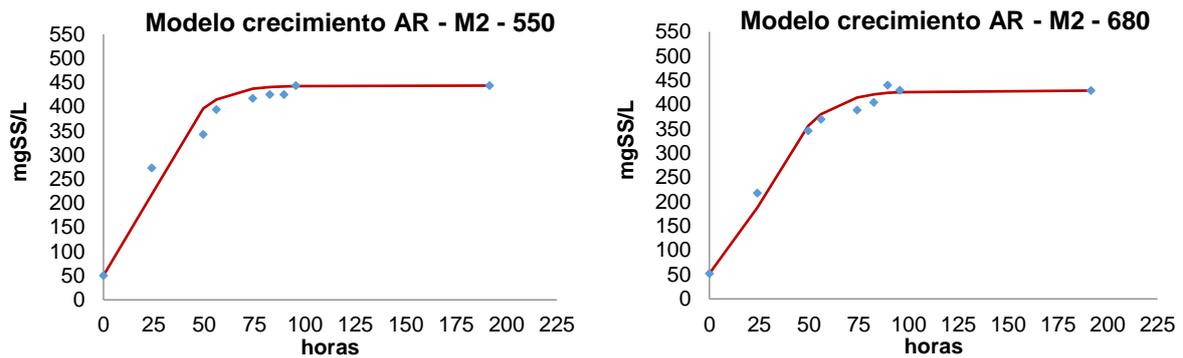


Figura 26. Gráficas modelo crecimiento AR – M2.

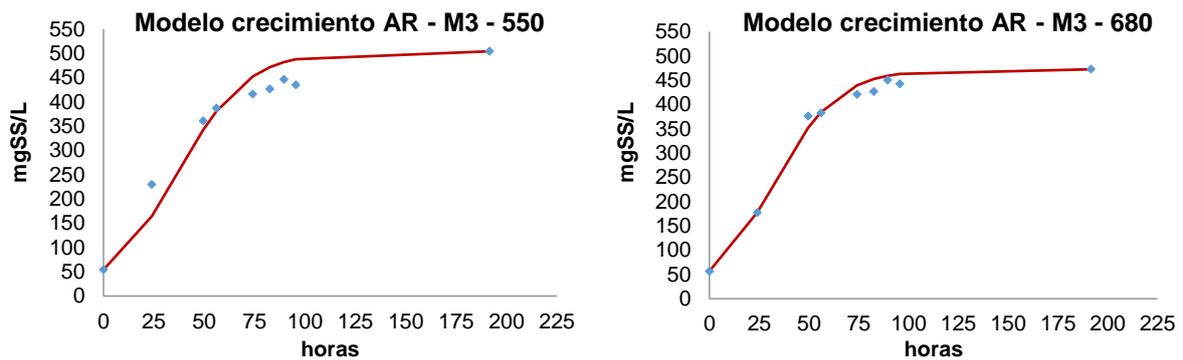


Figura 27. Gráficas modelo crecimiento AR – M3.

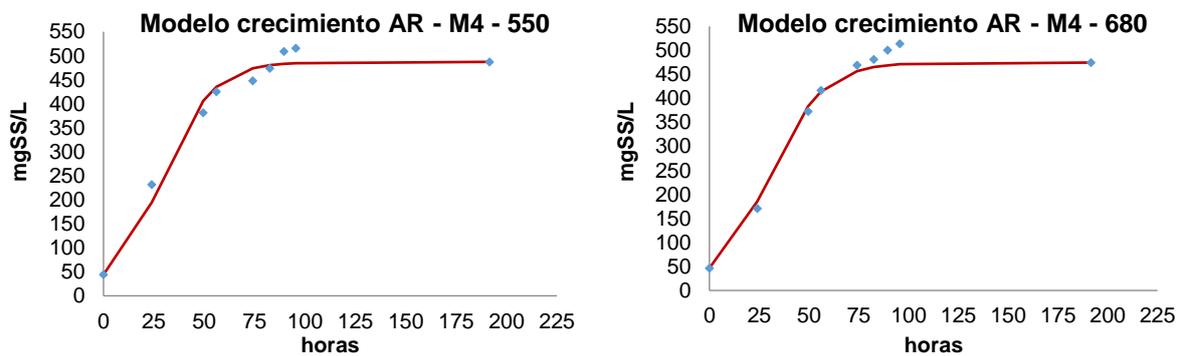


Figura 28. Gráficas modelo crecimiento AR – M4.

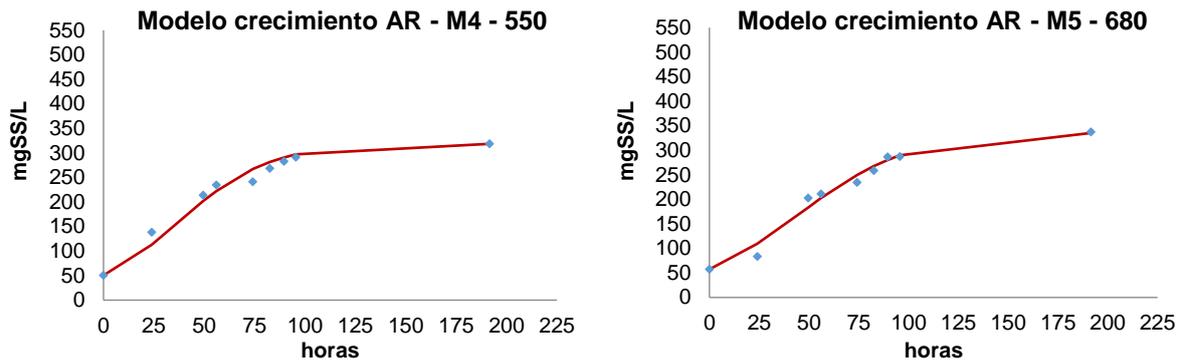


Figura 29. Gráficas modelo crecimiento AR – M5.

En el modelo Verlhust de las gráficas de crecimiento de AR se encuentra más atenuado la fase exponencial 3 en las todas las muestras menos en M5 (ver Fig. 25, 26,27 y 28). Por otro lado, en la muestra M5 (ver Fig. 23) la gráfica finaliza en la fase 5 estacionaria, sucede a una menor concentración de biomasa.

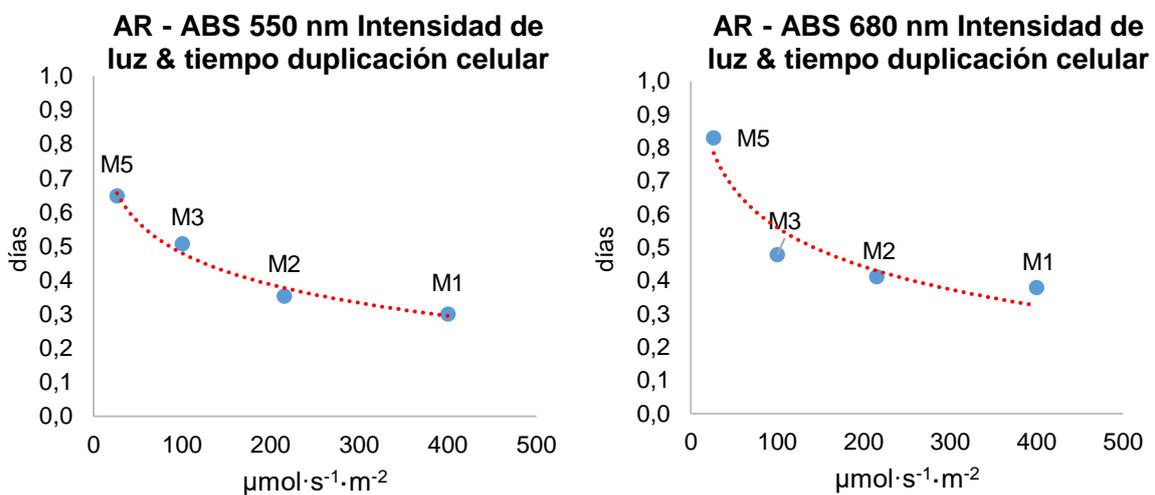


Figura 30. Gráficas de la relación Intensidad de Luz & tasa de crecimiento AR.

En las gráficas y en el estudio de relación del tiempo de duplicación celular con la intensidad de luz, no se ha tenido en cuenta la alícuota M4 por los datos obtenidos.

Al contrario que en medio mineral BBM donde el tiempo de crecimiento algal menor es el de la muestra M1 (0,523 para absorbancia 550 nm) es menos de la mitad que la muestra M5 (1,313 para absorbancia 550 nm), en agua residual el crecimiento es más rápido siendo para M1 (0,300 para absorbancia 550 nm) y el mayor tiempo de crecimiento M5 (0,613 para absorbancia 550 nm).

El principal problema al que se enfrentan actualmente, es que la mayoría de los estudios realizados se han simulado utilizando aguas residuales sintéticas que en realidad eliminan problemas como la interferencia del color, los sólidos suspendidos y la presencia de otros organismos [23].

#### 4.4. Evaluación del potencial de oxigenación por energía aplicada

Los datos que han utilizado para evaluar el potencial de oxigenación se han obtenido de derivar de la curva obtenida de la producción de oxígeno respecto al tiempo a diferentes intensidades de luz (ver Anexo XVI).

| Potencia LED | Ensayos O2 | Distancia (cm) | Intensidad Led ( $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | Pot. Oxigenación y' |
|--------------|------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 0            | 0          | 75             | 54                                                                         | 0,0008              |
| 1            | 1          | 80             | 132                                                                        | 0,0074              |
| 1            | 2          | 55             | 224                                                                        | 0,0132              |
| 1            | 3          | 35             | 380                                                                        | 0,0128              |
| 1            | 4          | 25             | 515                                                                        | 0,0115              |
| 1            | 5          | 20             | 643                                                                        | 0,0110              |
| 1            | 6          | 15             | 924                                                                        | 0,0110              |
| 1            | 7          | 10             | 1675                                                                       | 0,0095              |
| 2            | 10         | 10             | 3739                                                                       | 0,0072              |
| 2            | 9          | 5              | 5875                                                                       | 0,0016              |

Tabla 7. Datos de los ensayos de producción oxígeno a diferentes intensidades de luz.

La producción de oxígeno sufre un gran incremento a pequeños incrementos de intensidades de luz, por debajo  $224 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . A partir de esta intensidad el potencial de oxigenación disminuye a grandes incrementos de intensidad de luz (ver Fig. 32).

La relación fundamental entre la intensidad de la luz y la fotosíntesis para las células de las microalgas (ver Fig. 31), se representa por "relaciones PI" (P para la tasa de fotosíntesis y I para la intensidad de la luz) que representan tres distintos regímenes de luz [24].

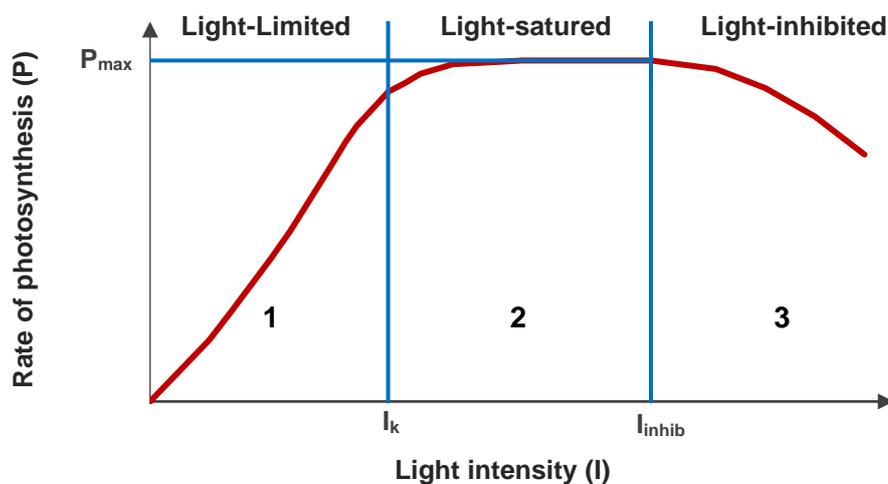


Figura 31. Relación entre intensidad de luz y fotosíntesis.

- 1) A bajas intensidades de luz, la tasa de fotosíntesis suele ser proporcional a la intensidad de la luz porque la fotosíntesis está limitada por la velocidad de captura de fotones.
- 2) Cuando la intensidad de la luz alcanza un umbral de saturación ( $I_k$ ), las algas se vuelven 'Saturadas de luz' porque su tasa de fotosíntesis es ahora limitada por la velocidad de las reacciones después de la captura de fotones. Bajo esta condición, la tasa de fotosíntesis es generalmente máxima e independiente de la intensidad de la luz.
- 3) Si la intensidad de la luz aumenta más allá de un umbral inhibitorio ( $I_{inhib}$ ), la tasa de fotosíntesis comienza a disminuir con la intensidad de la luz debido a la desactivación de proteínas clave en la fotosíntesis.

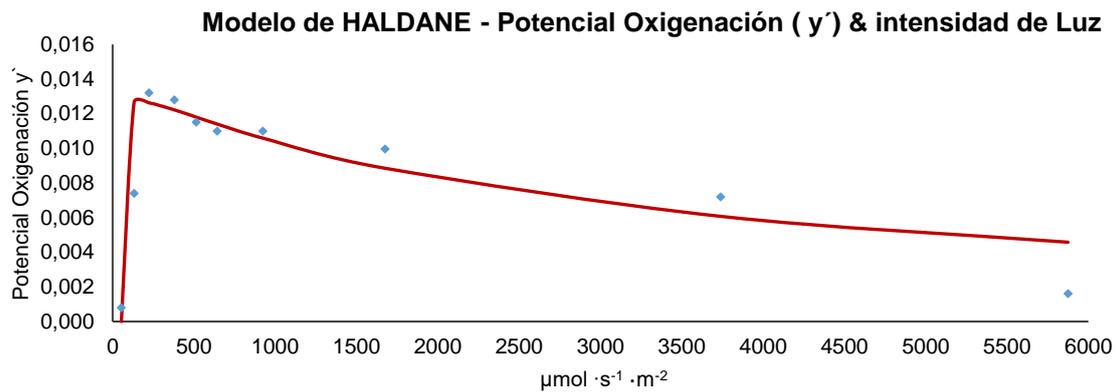


Figura 32. Gráfica Modelo Haldane del Potencial oxigenación & Intensidad de Luz.

En el modelo de Haldane se puede observar que a bajas intensidades de luz, la tasa de fotosíntesis es proporcional a la intensidad de la luz porque la fotosíntesis está limitada por la velocidad de captura de fotones. El umbral de saturación ( $I_k$ ) se sitúa en  $224 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  donde la tasa de fotosíntesis es máxima. El umbral inhibitorio ( $I_{\text{inhib}}$ ) es a partir de  $380 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , la tasa de fotosíntesis comienza a disminuir con la intensidad de la luz debido a la desactivación de proteínas clave en la fotosíntesis por fotoinhibición.

#### 4.5. Evaluación del potencial de oxigenación a diferentes pH

Los resultados obtenidos en la evaluación del potencial de oxigenación se pueden observar en la Tabla 8 a los diferentes pH.

|                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>pH ácidos</b>      | 1,14   | 2,43   | 3,76   | 4,25   | 4,73   | 5,17   | 5,76   | 6,42   | 6,46   | 6,89   |
| <b>P. Oxigenación</b> | 0,0036 | 0,0061 | 0,0093 | 0,0115 | 0,013  | 0,0162 | 0,0167 | 0,0156 | 0,0165 | 0,0151 |
| <b>pH básicos</b>     | 7,3    | 8,09   | 8,4    | 9,14   | 9,65   | 9,74   | 10,85  | 11,66  | 11,91  | 12,04  |
| <b>P. Oxigenación</b> | 0,0144 | 0,0122 | 0,0118 | 0,0129 | 0,0118 | 0,0139 | 0,0122 | 0,0105 | 0,0089 | 0,0000 |

Tabla 8. Datos ensayos producción oxígeno a diferentes pH.

Estos datos se han obtenido de derivar de la curva obtenida de la producción de oxígeno respecto al tiempo (ver Anexo XVII).

Las modificaciones del pH afectan a las concentraciones en equilibrio del  $\text{CO}_2$  en agua. El comportamiento de la producción de oxígeno de pH ácido a pH neutro sufre un incremento exponencial (ver Fig. 33). Se ha observado que el valor óptimo de producción de oxígeno está comprendido entre pH 5 y pH 7. A partir de pH 8, el equilibrio de los iones hidrógeno carbonatos y carbonatos aumenta, por lo que la producción de oxígeno disminuye.

La producción de oxígeno en el proceso de la fotosíntesis de las microalgas depende de la tasa de crecimiento que, a su vez, se ve influenciada por la intensidad de la luz, la temperatura y el pH. Por otro lado, la concentración microalgal está inversamente relacionada con la concentración de  $\text{CO}_2$  [25]. A pH 12, el equilibrio se desplaza a los iones carbonatos que no permiten el crecimiento algal por lo que la producción de oxígeno es nula (ver Fig. 34).

Los datos de las curvas de producción de oxígeno a distintos pH se adjuntan en el Anexo XVII.

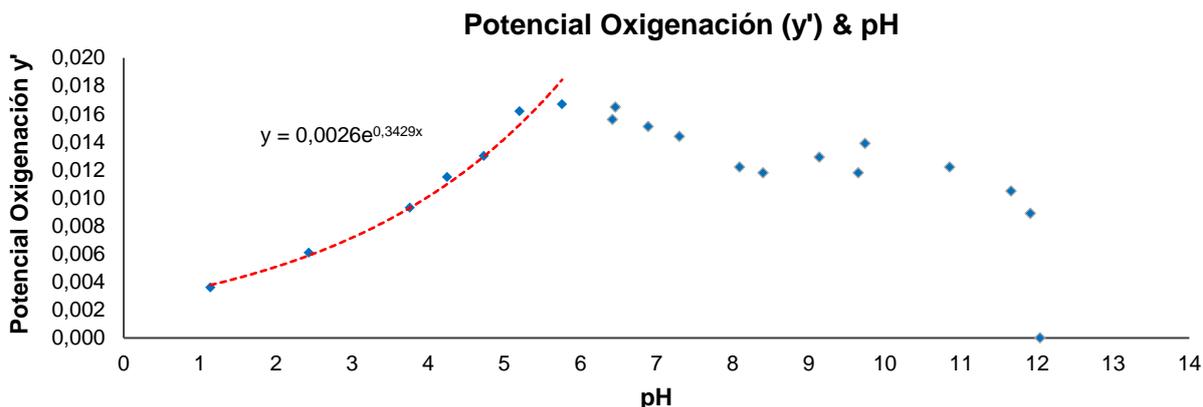


Figura 33. Gráfica del Potencial de oxigenación & pH.

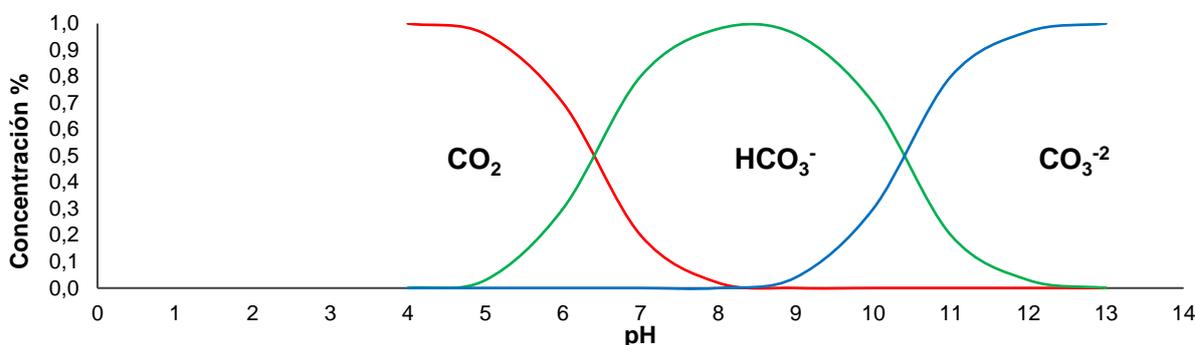


Figura 34. Gráfica del comportamiento del  $\text{CO}_2$  en agua a diferentes pH.

Las aguas residuales contienen nutrientes, fósforo y nitratos que favorecen el crecimiento de las microalgas. Además, requieren una gran cantidad de  $\text{CO}_2$ , 1 kg de la microalga seca requiere aproximadamente 1,8 kg de  $\text{CO}_2$  para sobrevivir. Esta característica es propia de cada cepa y hace que sea un tratamiento sostenible por su captación de gases de efecto invernadero [26].

#### 4.6. Rendimientos Fotobiorreactor para depuración aguas residuales

Los resultados obtenidos en los análisis del proceso (ver Tabla. 9, 10, 11 y 12) de depuración de las AR con microalgas en el Fotobiorreactor son muy positivos, con rendimientos comprendidos entre el 70-90 % y cumpliendo los valores los parámetros de vertidos de acuerdo con el Real Decreto-Ley 11/1995.

| Fecha      | SST mg/L |        | Rendimiento % |
|------------|----------|--------|---------------|
|            | Entrada  | Salida |               |
| 09/05/2018 | 0,172    | 0,012  | 93,02%        |
| 11/05/2018 | 0,174    | 0,006  | 96,55%        |
| 14/05/2018 | 0,166    | 0,010  | 93,98%        |
| 16/05/2018 | 0,168    | 0,008  | 95,24%        |
| 18/05/2018 | 0,200    | 0,008  | 96,00%        |
| 21/05/2018 | 0,250    | 0,004  | 98,40%        |
| 23/05/2018 | 0,170    | 0,010  | 94,12%        |
| 25/05/2018 | 0,164    | 0,006  | 96,34%        |
| 28/05/2018 | 0,175    | 0,008  | 95,43%        |
| 0/05/2018  | 0,180    | 0,006  | 96,67%        |

Tabla 9. Datos análisis SST Fotobiorreactor.

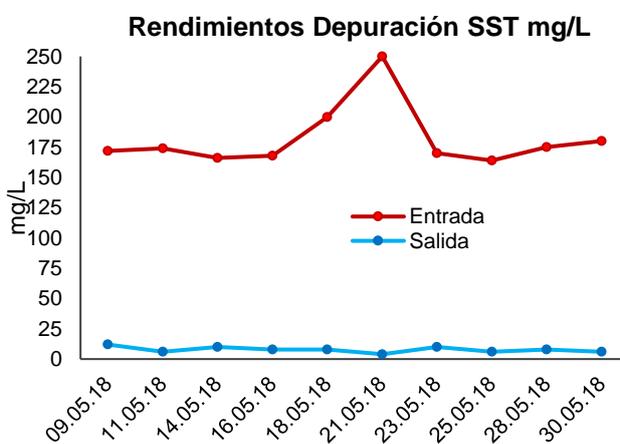


Figura 35. Gráfica del rendimiento depuración SST.

| Fecha      | DQO ppm  |          | Rendimiento % |
|------------|----------|----------|---------------|
|            | Entrada  | Salida   |               |
| 09/05/2018 | 284,2394 | 70,0220  | 75,37%        |
| 11/05/2018 | 261,8213 | 72,5129  | 72,30%        |
| 14/05/2018 | 296,6939 | 119,8400 | 59,61%        |
| 16/05/2018 | 231,9305 | 70,0220  | 69,81%        |
| 18/05/2018 | 294,2030 | 75,0038  | 74,51%        |
| 21/05/2018 | 254,3486 | 52,5857  | 79,33%        |
| 23/05/2018 | 224,4578 | 62,5493  | 72,13%        |
| 25/05/2018 | 256,8395 | 70,0220  | 72,74%        |
| 28/05/2018 | 259,3304 | 65,0402  | 74,92%        |
| 30/05/2018 | 294,2030 | 60,0584  | 79,59%        |

Tabla 10. Datos análisis DQO Fotobiorreactor.

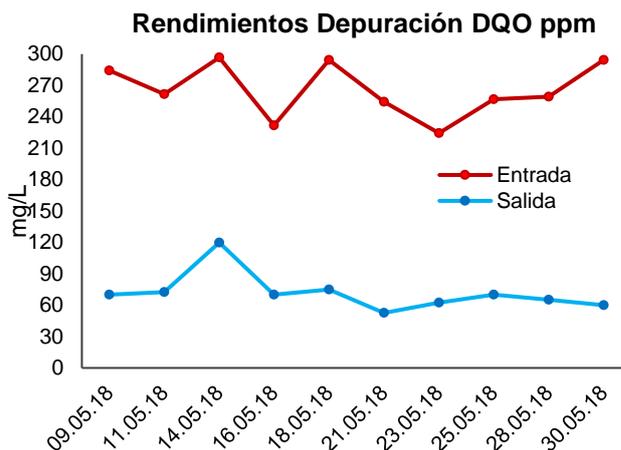


Figura 36. Gráfica del rendimiento de depuración DQO.

| Fecha      | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/L |        | Rendimiento % |
|------------|-------------------------------------|--------|---------------|
|            | Entrada                             | Salida |               |
| 09/05/2018 | 6,7822                              | 0,1968 | 97,10%        |
| 11/05/2018 | 6,9527                              | 0,1741 | 97,50%        |
| 14/05/2018 | 7,7485                              | 0,1911 | 97,53%        |
| 16/05/2018 | 11,8976                             | 0,7936 | 93,33%        |
| 18/05/2018 | 11,5793                             | 0,7197 | 93,78%        |
| 21/05/2018 | 10,9200                             | 0,2025 | 98,15%        |
| 23/05/2018 | 12,0568                             | 0,1172 | 99,03%        |
| 25/05/2018 | 11,7158                             | 0,1286 | 98,90%        |
| 28/05/2018 | 11,7726                             | 0,1229 | 98,96%        |
| 30/05/2018 | 11,5452                             | 0,1172 | 98,98%        |

Tabla 11. Datos análisis N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Fotobiorreactor.

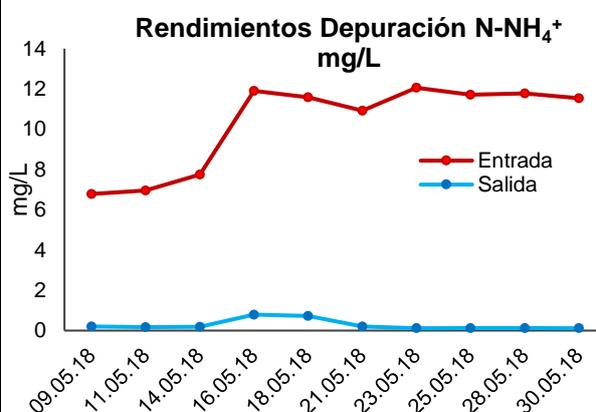


Figura 37. Gráfica del rendimiento de depuración N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

| Fecha      | P - PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/L |        | Rendimiento % |
|------------|----------------------------------------|--------|---------------|
|            | Entrada                                | Salida |               |
| 09/05/2018 | 11,9210                                | 4,8212 | 59,56%        |
| 11/05/2018 | 9,5029                                 | 4,3581 | 54,14%        |
| 14/05/2018 | 6,5704                                 | 4,9755 | 24,27%        |
| 16/05/2018 | 7,1878                                 | 3,9980 | 44,38%        |
| 18/05/2018 | 7,2907                                 | 3,5864 | 50,81%        |
| 21/05/2018 | 6,7762                                 | 3,8951 | 42,52%        |
| 23/05/2018 | 6,0559                                 | 3,0205 | 50,12%        |
| 25/05/2018 | 6,3132                                 | 3,1748 | 49,71%        |
| 28/05/2018 | 6,5704                                 | 2,9690 | 54,81%        |
| 30/05/2018 | 6,5704                                 | 3,1234 | 52,46%        |

Tabla 12. Datos análisis P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> Fotobiorreactor.

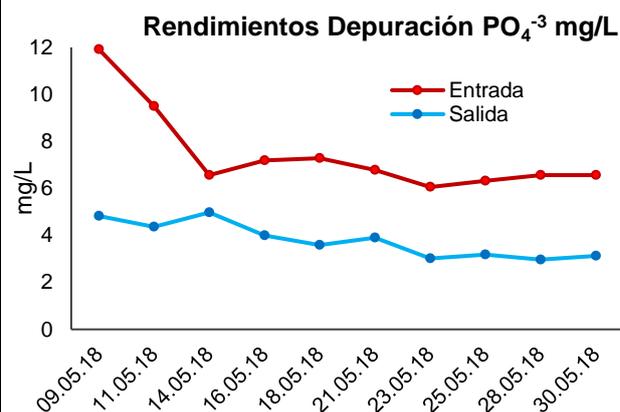


Figura 38. Gráfica del rendimiento de depuración P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>.

La reacción estequiométrica que corresponde al proceso del crecimiento celular es la siguiente:



Debido a que la necesidad de fósforo es menor que otros nutrientes los rendimientos de depuración del PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> son los menores. Los datos y las curvas de dilución N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> y DQO, se pueden ver en los Anexos XVIII, XIX y XX respectivamente.

Las mediciones diarias del fotobiorreactor consistían en la producción de oxígeno y en el pH. A continuación se pueden observar en la Fig. 39 y 40 los días 11 y 12 de junio de 2018.

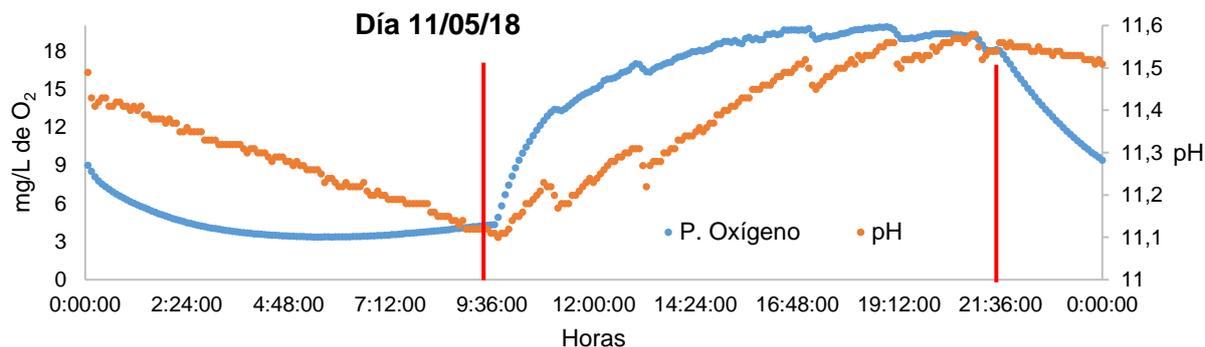


Figura 39. Producción de oxígeno y pH en Fotobiorreactor 11.05.18.

La placa LED daba intensidad de luz al fotobiorreactor comenzando a las 9:30 pm y finalizando a las 21:30 pm, como aparece en rojo en la Fig. 39. La producción de oxígeno tiene un comportamiento similar a los modelos de los ensayos en batch, un incremento exponencial hasta un máximo que permanece constante hasta que finaliza la fuente de alimentación.

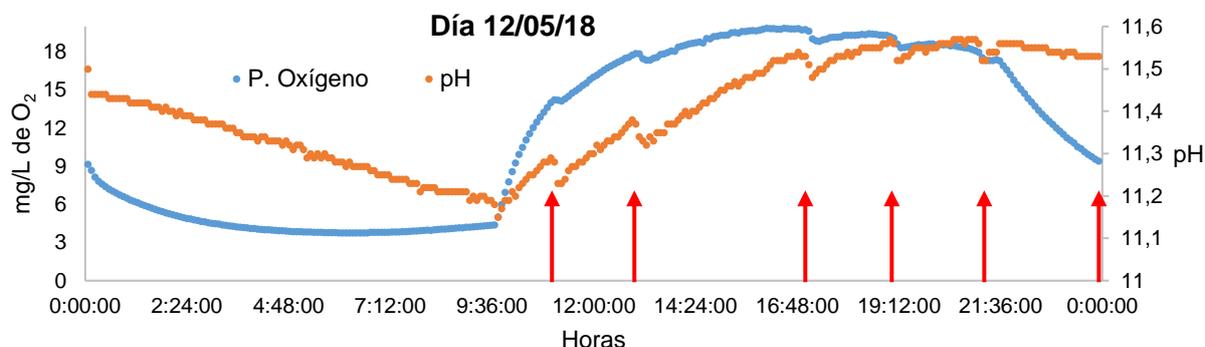


Figura 40. Producción de oxígeno y pH en Fotobiorreactor 12.05.18.

La alimentación de AR al fotobiorreactor se producía en 6 intervalos de 10 minutos, como aparece en rojo en la Fig. 40. Se puede observar que cada vez que se alimentaba se modifica sustancialmente el oxígeno disuelto y el pH.

Como hemos visto en el punto 4.5, debido al consumo de carbono de las microalgas en la fotosíntesis, se produce un aumento de pH. Existe un máximo donde la producción de oxígeno no aumenta debido a la Fotorrespiración, la alta concentración de oxígeno disuelto dificulta la fotosíntesis e invierte el proceso de transformación de  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$ .

Los datos de la concentración de microalgas en mg/L del Fotobiorreactor se pueden ver en la Tabla 13.

| Fecha      | PBR (mg/L) |
|------------|------------|
| 09/05/2018 | 0,580      |
| 11/05/2018 | 0,560      |
| 14/05/2018 | 0,475      |
| 16/05/2018 | 0,485      |
| 18/05/2018 | 0,345      |
| 21/05/2018 | 0,415      |
| 23/05/2018 | 0,370      |
| 25/05/2018 | 0,345      |
| 28/05/2018 | 0,380      |
| 30/05/2018 | 0,395      |

Tabla 13. Biomasa mg/L en el PBR.

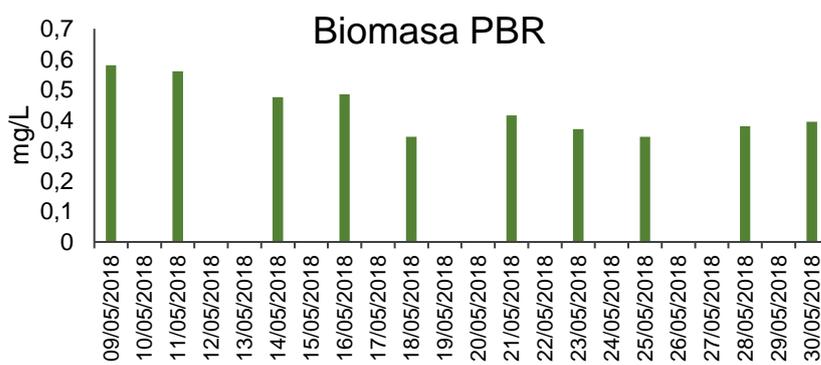


Figura 41. Concentración biomasa en PBR.

## 5. CONCLUSIONES

La depuración de aguas residuales con microalgas obtiene muy buenos rendimientos de eliminación de parámetros indicadores para aglomeraciones urbanas menores de 2.000 h-e cumpliendo los límites de vertido de la legislación vigente, exceptuando el rendimiento del fósforo.

El estudio del crecimiento algal determina que la cinética de saturación respecto a la variable de intensidad de luz es mayor en el agua residual que en el medio mineral (*Bold's Basal Medium*) debido a la simbiosis que existe entre Algas-Bacterias. El tiempo de duplicación celular es menor en agua residual pero la producción de Biomasa Algal es mayor en el medio mineral duplicando su concentración en fase estacionaria. Una de las causas es por la diferencia de nutrientes, principalmente en la fuente de carbono.

El potencial de producción de oxígeno viene relacionado con el crecimiento algal. Los resultados comparados con modelos de respuesta cinética validados para reacciones bioquímicas y crecimiento microbiano han demostrado que la producción máxima de oxígeno se encuentra entre  $300-1.000 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , siendo la luz solar un día de verano con una irradiación  $1.000-1.500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , donde nunca se llega a la fotoinhibición.

Por otro lado, se ha demostrado que el pH es un factor limitante para la producción de oxígeno siendo nulo a pH 12. El efecto del aumento del pH se vincula principalmente a las distintas formas solubles en las que el  $\text{CO}_2$  se transforma solubilizado.

Existe otro factor limitante en la producción de oxígeno que se ha podido observar en el estudio diario del fotobiorreactor, la fotorrespiración. El crecimiento microalgal comienza de manera exponencial a medida que recibe intensidad de luz constante hasta que la concentración de oxígeno disuelto llega a un máximo y dificulta la fotosíntesis.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Pilon, L., H. Berberoğlu, and R. Kandilian, *Radiation transfer in photobiological carbon dioxide fixation and fuel production by microalgae*. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011. **112**(17): p. 2639-2660.
2. Parry, M.L., J.P. Palut, and O.F. Canziani, *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007.
3. Pittman, J.K., A.P. Dean, and O. Osundeko, *The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources*. Bioresource Technology, 2011. **102**(1): p. 17-25.
4. Gude, V.G., *Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **45**: p. 52-68.
5. Yu, K.L., et al., *Microalgae from wastewater treatment to biochar – Feedstock preparation and conversion technologies*. Energy Conversion and Management, 2017. **150**: p. 1-13.
6. Eze, V.C., et al., *Kinetic modelling of microalgae cultivation for wastewater treatment and carbon dioxide sequestration*. Algal Research, 2018. **32**: p. 131-141.
7. Otondo, A., et al., *Energetic evaluation of wastewater treatment using microalgae, Chlorella vulgaris*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018. **6**(2): p. 3213-3222.
8. Wang, Y., et al., *Perspectives on the feasibility of using microalgae for industrial wastewater treatment*. Bioresour Technol, 2016. **222**: p. 485-497.
9. Arias, D.M., et al., *Integrating microalgae tertiary treatment into activated sludge systems for energy and nutrients recovery from wastewater*. Bioresour Technol, 2018. **247**: p. 513-519.
10. Ullah, K., et al., *Assessing the potential of algal biomass opportunities for bioenergy industry: A review*. Fuel, 2015. **143**: p. 414-423.
11. Chen, J., et al., *The potential of microalgae in biodiesel production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **90**: p. 336-346.
12. Raghuvanshi, S., et al., *Comparative Study Using Life Cycle Approach for the Biodiesel Production from Microalgae Grown in Wastewater and Fresh Water*. Procedia CIRP, 2018. **69**: p. 568-572.
13. Olsson, J., et al., *Co-digestion of cultivated microalgae and sewage sludge from municipal waste water treatment*. Bioresour Technol, 2014. **171**: p. 203-10.
14. Shrivastav, A., et al., *A comprehensive mechanistic model for simulating algal-bacterial growth dynamics in photobioreactors*. Bioresour Technol, 2018. **247**: p. 640-651.
15. Chen P, M.M., Chen Y, Wang L, Li Y, Chen Q, et al, *Review of biological and engineering aspect of algae to fuels approach*. International Journal of Agrc Biol Eng, 2010. **2**(49): p. 1-30.
16. Abdel-Raouf, N., A.A. Al-Homaidan, and I.B. Ibraheem, *Microalgae and wastewater treatment*. Saudi J Biol Sci, 2012. **19**(3): p. 257-75.
17. Li, Y., et al., *Chlamydomonas starchless mutant defective in ADP-glucose pyrophosphorylase hyper-accumulates triacylglycerol*. Metab Eng, 2010. **12**(4): p. 387-91.

18. Yan, C., et al., *The effects of various LED (light emitting diode) lighting strategies on simultaneous biogas upgrading and biogas slurry nutrient reduction by using of microalgae Chlorella sp.* Energy, 2016. **106**: p. 554-561.
19. Costache, T.A., et al., *Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors.* Appl Microbiol Biotechnol, 2013. **97**(17): p. 7627-37.
20. James C. Ogonna, T.S., Hideo Tanaka, *An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors.* Journal of Biotechnology. **Volume 70**: p. Pages 289–297.
21. Munoz, R. and B. Guieysse, *Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review.* Water Res, 2006. **40**(15): p. 2799-815.
22. Acién Fernández, F.G., J.M. Fernández Sevilla, and E. Molina Grima, *Photobioreactors for the production of microalgae.* Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2013. **12**(2): p. 131-151.
23. Duong, V.T., et al., *Microalgae Isolation and Selection for Prospective Biodiesel Production.* Energies, 2012. **5**(6): p. 1835-1849.
24. Béchet, Q., A. Shilton, and B. Guieysse, *Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation.* Biotechnology Advances, 2013. **31**(8): p. 1648-1663.
25. Bello, M., P. Ranganathan, and F. Brennan, *Dynamic modelling of microalgae cultivation process in high rate algal wastewater pond.* Algal Research, 2017. **24**: p. 457-466.
26. Zhan, J., et al., *Selection and characterization of eight freshwater green algae strains for synchronous water purification and lipid production.* Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016. **10**(3): p. 548-558.

## INDICE FIGURAS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. EDAR el Torno, Chiclana de la Frontera. Proyecto ALL-GAS.....                                  | 3  |
| Figura 2. Esquema digestión algas con lodos de EDAR.....                                                 | 4  |
| Figura 3. Esquema digestión anaerobia de algas.....                                                      | 5  |
| Figura 4. Flujograma del trabajo de investigación del TFM.....                                           | 8  |
| Figura 5, Figura 6, Figura 7. Presa de Buitrago, cepa autóctona de microalga y vista al microscopio..... | 9  |
| Figura 8, Figura 9, Figura 10. Toma de medidas de intensidad de luz y puntos medición LED.....           | 10 |
| Figura 11, Figura 12. Ensayos <i>batch</i> de microalgas.....                                            | 11 |
| Figura 13. Cubetas de medición de absorbancia.....                                                       | 11 |
| Figura 14. Instalación depuración con Fotobiorreactor.....                                               | 13 |
| Figura 15, Figura 16. Equipo para ensayos de potencial de oxigenación.....                               | 14 |
| Figura 17. Gráfica de las intensidades de luz Punto 1 de la Placa LED.....                               | 16 |
| Figura 18. Fases del crecimiento microalgal.....                                                         | 16 |
| Figura 19. Gráficas modelo crecimiento BBM – M1.....                                                     | 17 |
| Figura 20. Gráficas modelo crecimiento BBM – M2.....                                                     | 17 |
| Figura 21. Gráficas modelo crecimiento BBM – M3.....                                                     | 17 |
| Figura 22. Gráficas modelo crecimiento BBM – M4.....                                                     | 17 |
| Figura 23. Gráficas modelo crecimiento BBM – M5.....                                                     | 18 |
| Figura 24. Gráficas de la relación Intensidad de Luz & tasa de crecimiento BBM.....                      | 18 |
| Figura 25. Gráficas modelo crecimiento AR – M1.....                                                      | 19 |
| Figura 26. Gráficas modelo crecimiento AR – M2.....                                                      | 19 |
| Figura 27. Gráficas modelo crecimiento AR – M3.....                                                      | 19 |
| Figura 28. Gráficas modelo crecimiento AR – M4.....                                                      | 19 |
| Figura 29. Gráficas modelo crecimiento AR – M5.....                                                      | 20 |
| Figura 30. Gráficas de la relación Intensidad de Luz & tasa de crecimiento AR.....                       | 20 |
| Figura 31. Relación entre intensidad de luz y fotosíntesis.....                                          | 21 |
| Figura 32. Gráfica Modelo Haldane del Potencial oxigenación & Intensidad de Luz.....                     | 22 |
| Figura 33. Gráfica del Potencial de oxigenación & pH.....                                                | 23 |
| Figura 34. Gráfica del comportamiento del CO <sub>2</sub> en agua a diferentes pH.....                   | 23 |
| Figura 35. Gráfica del rendimiento depuración SST.....                                                   | 23 |
| Figura 36. Gráfica del rendimiento depuración DQO.....                                                   | 24 |
| Figura 37. Gráfica del rendimiento depuración N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....                       | 24 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 38. Gráfica del rendimiento depuración P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> . | 24 |
| Figura 39. Producción de oxígeno y pH en Fotobiorreactor 11.05.18.              | 25 |
| Figura 40. Producción de oxígeno y pH en Fotobiorreactor 12.05.18.              | 25 |
| Figura 41. Concentración biomasa en PBR.                                        | 25 |
| Figura 42. Comportamiento sensor con ángulos de incidencia de la luz.           | 34 |
| Figura 43. Gráfica de las intensidades de luz Punto 1 de la Placa LED.          | 35 |
| Figura 44. Gráfica de las intensidades de luz Punto 2 de la Placa LED.          | 36 |
| Figura 45. Gráfica de las intensidades de luz Punto 3 de la Placa LED.          | 37 |
| Figura 46. Gráfica de las intensidades de luz Punto 4 de la Placa LED.          | 38 |
| Figura 47. Gráfica curva dilución BBM - ABS 550 nm.                             | 41 |
| Figura 48. Gráfica curva dilución BBM -ABS 680 nm.                              | 41 |
| Figura 49. Esquema funcionamiento EDAR Medinaceli – SCADA.                      | 42 |
| Figura 50. Gráfica curva dilución AR -ABS 550 nm.                               | 44 |
| Figura 51. Gráfica curva dilución AR -ABS 680 nm.                               | 44 |
| Figura 52. Gráficas producción de oxígeno Potencia 0-1 Distancias 75-80 cm.     | 58 |
| Figura 53. Gráficas producción de oxígeno Potencia 1-1 Distancias 55-35 cm.     | 58 |
| Figura 54. Gráficas producción de oxígeno Potencia 1-1 Distancias 25-20 cm.     | 58 |
| Figura 55. Gráficas producción de oxígeno Potencia 1-1 Distancias 15-10 cm.     | 59 |
| Figura 56. Gráficas producción de oxígeno Potencia 2-2 Distancias 10-5 cm.      | 59 |
| Figura 57. Gráficas producción de oxígeno pH 1,14 y 2,43.                       | 60 |
| Figura 58. Gráficas producción de oxígeno pH 3,76 y 4,25.                       | 60 |
| Figura 59. Gráficas producción de oxígeno pH 4,73 y 5,17.                       | 60 |
| Figura 60. Gráficas producción de oxígeno pH 5,60 y 5,76.                       | 61 |
| Figura 61. Gráficas producción de oxígeno pH 6,42 y 6,46.                       | 61 |
| Figura 62. Gráficas producción de oxígeno pH 6,89 y 7,30.                       | 61 |
| Figura 63. Gráficas producción de oxígeno pH 8,09 y 8,40.                       | 61 |
| Figura 64. Gráficas producción de oxígeno pH 9,14 y 9,65.                       | 62 |
| Figura 65. Gráficas producción de oxígeno pH 10,85 y 11,66.                     | 62 |
| Figura 66. Gráficas producción de oxígeno pH 11,91 y 12,04.                     | 62 |
| Figura 67. Gráfica curva dilución N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .              | 63 |
| Figura 68. Gráfica curva dilución P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> .             | 64 |
| Figura 69. Gráfica curva dilución DQO.                                          | 65 |

## INDICE TABLAS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Datos muestras ensayo BBM. ....                                                   | 10 |
| Tabla 2. Datos parámetros EDAR Medinaceli. ....                                            | 12 |
| Tabla 3. Tiempos de alimentación Fotobiorreactor. ....                                     | 13 |
| Tabla 4. Intensidades de luz para producción máxima de oxígeno. ....                       | 14 |
| Tabla 5. pH de los ensayos de producción máxima oxígeno. ....                              | 15 |
| Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos analizados en Fotobiorreactor. ....                     | 15 |
| Tabla 7. Datos de los ensayos de producción oxígeno a diferentes intensidades de luz. .... | 21 |
| Tabla 8. Datos ensayos producción oxígeno a diferentes pH. ....                            | 22 |
| Tabla 9. Datos análisis SST Fotobiorreactor. ST. ....                                      | 23 |
| Tabla 10. Datos análisis DQO Fotobiorreactor. ....                                         | 24 |
| Tabla 11. Datos análisis N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Fotobiorreactor. ....              | 24 |
| Tabla 12. Datos análisis P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> Fotobiorreactor. ....             | 24 |
| Tabla 13. Biomasa mg/L en el PBR. ....                                                     | 25 |
| Tabla 14. Datos Placa LED – P1. ....                                                       | 35 |
| Tabla 15. Datos Placa LED – P2. ....                                                       | 36 |
| Tabla 16. Datos Placa LED – P3. ....                                                       | 37 |
| Tabla 17. Datos Placa LED – P4. ....                                                       | 38 |
| Tabla 18. Datos Bold’s Basal Medium. ....                                                  | 39 |
| Tabla 19. Datos Bold’s Basal Medium absorbancias 550 nm. ....                              | 40 |
| Tabla 20. Datos Bold’s Basal Medium absorbancias 680 nm. ....                              | 40 |
| Tabla 21. Curvas dilución Bold’s Basal Medium ABS 550 y 680 nm. ....                       | 41 |
| Tabla 22. Datos agua residual Absorbancias 550 nm. ....                                    | 43 |
| Tabla 23. Datos agua residual Absorbancias 680 nm. ....                                    | 43 |
| Tabla 24. Curvas dilución agua residual ABS 550 y 680 nm. ....                             | 44 |
| Tabla 25. Equipo de alimentación de agua residual al fotobiorreactor. ....                 | 45 |
| Tabla 26. Equipo de extracción del licor mezcla del fotobiorreactor. ....                  | 45 |
| Tabla 27. Equipo de medición oxígeno disuelto y pH. ....                                   | 45 |
| Tabla 28. Datos curva M1 BBM Absorbancia 550 nm. ....                                      | 46 |
| Tabla 29. Datos curva M2 BBM Absorbancia 550 nm. ....                                      | 46 |
| Tabla 30. Datos curva M3 BBM Absorbancia 550 nm. ....                                      | 47 |
| Tabla 31. Datos curva M4 BBM Absorbancia 550 nm. ....                                      | 47 |
| Tabla 32. Datos curva M5 BBM Absorbancia 550 nm. ....                                      | 48 |
| Tabla 33. Datos curva M1 BBM Absorbancia 680 nm. ....                                      | 49 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 34. Datos curva M2 BBM Absorbancia 680 nm. ....                                     | 49 |
| Tabla 35. Datos curva M3 BBM Absorbancia 680 nm. ....                                     | 50 |
| Tabla 36. Datos curva M4 BBM Absorbancia 680 nm. ....                                     | 50 |
| Tabla 37. Datos curva M5 BBM Absorbancia 680 nm. ....                                     | 51 |
| Tabla 38. Datos curva M1 AR Absorbancia 550 nm. ....                                      | 52 |
| Tabla 39. Datos curva M2 AR Absorbancia 550 nm. ....                                      | 52 |
| Tabla 40. Datos curva M3 AR Absorbancia 550 nm. ....                                      | 52 |
| Tabla 41. Datos curva M4 AR Absorbancia 550 nm. ....                                      | 53 |
| Tabla 42. Datos curva M5 AR Absorbancia 550 nm. ....                                      | 53 |
| Tabla 43. Datos curva M1 AR Absorbancia 680 nm. ....                                      | 54 |
| Tabla 44. Datos curva M2 AR Absorbancia 680 nm. ....                                      | 54 |
| Tabla 45. Datos curva M3 AR Absorbancia 680 nm. ....                                      | 54 |
| Tabla 46. Datos curva M4 AR Absorbancia 680 nm. ....                                      | 55 |
| Tabla 47. Datos curva M5 AR Absorbancia 680 nm. ....                                      | 55 |
| Tabla 48. Métodos análisis parámetros fisicoquímicos en EDAR. ....                        | 57 |
| Tabla 49. Datos del potencial de oxigenación a diferentes intensidades de luz. ....       | 58 |
| Tabla 50. Datos de pH y potencial de oxigenación. ....                                    | 60 |
| Tabla 51. Datos de la curva dilución concentración N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> . ....  | 63 |
| Tabla 52. Datos de análisis de N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> PBR. ....                   | 63 |
| Tabla 53. Datos de la curva dilución concentración P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> . .... | 64 |
| Tabla 54. Datos análisis P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> PBR. ....                        | 64 |
| Tabla 55. Datos de la curva dilución concentración DQO. ....                              | 65 |
| Tabla 56. Datos análisis DQO PBR. ....                                                    | 65 |

## ACRÓNIMOS

|      |                                          |
|------|------------------------------------------|
| EDAR | Estación depuradora de aguas residuales. |
| BMP  | Potencial de metano bioquímico.          |
| CEE  | Comunidad económica europea.             |
| CE   | Comisión Europea                         |
| e-h  | Habitantes equivalentes.                 |
| ACV  | Análisis de ciclo de vida.               |
| TFM  | Trabajo fin de máster.                   |
| PBR  | <i>Photo-bio-reactor.</i>                |
| LED  | <i>Light-emitting diode.</i>             |
| BNC  | <i>Bayonet Neill–Concelman.</i>          |
| TRH  | Tiempo de residencia hidráulico          |
| AR   | Aguas residuales.                        |
| DO   | Densidad óptica.                         |
| OD   | Oxígeno disuelto.                        |
| SST  | Sólidos totales en suspensión.           |
| DQO  | Demanda química de oxígeno.              |
| NTK  | Nitrógeno total Kjeldahl.                |
| Pt   | Fósforo Total.                           |

## ANEXOS

### ANEXO I. DATOS ESTUDIO LED

El LI-250A selecciona automáticamente un rango de sensibilidad para optimizar la precisión y la resolución de un sensor determinado. Proporciona un amplio rango dinámico para mediciones de alta resolución, incluso en condiciones de poca luz. Las unidades disponibles son las siguientes:  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ , lux, klux o  $\text{W m}^{-2}$ .

Este equipo además dispone de un amplificador de alta ganancia para la estabilidad a largo plazo, la puesta a cero automática y la baja impedancia de entrada con una buena linealidad.

#### Exactitud:

A 25 ° C:  $\pm 0,4\%$  de lectura  $\pm 3$  cuenta en el dígito menos significativo exhibido (todos los rangos).

0 - 55 ° C:  $\pm 0,6\%$  de lectura  $\pm 3$  cuenta en el dígito menos significativo exhibido (todos los rangos).

Selección de rango: Rango automático (3 rangos).

Linealidad:  $\pm 0,05\%$ .

Los sensores de luz terrestre LI-COR se corrigen con coseno, siguiendo la ley del coseno de Lambert. Esta corrección proporciona mediciones más precisas de radiación en una superficie plana de todos los ángulos. La corrección del coseno asegura mediciones precisas en diversas condiciones, como bajos niveles de luz y baja solar ángulos de elevación.

La radiación es recibida por un disco de acrílico llamado difusor u "ojo". Cuando la radiación es recibida con un mayor ángulo de incidencia, esta se recibe por el borde del difusor. Esto compensa el aumento de la reflexión de la superficie superior a medida que el ángulo de incidencia crece.

Con un ángulo de aproximadamente 80 °, el borde del sensor comienza a bloquear parte de la luz para mantener la respuesta correcta.

En un ángulo de 90 ° de incidencia, la llanta bloquea completamente el difusor, manteniendo con una respuesta coseno adecuada.

| 0 °                                                                  | 60 °                                                                                                   | 80 °                                                                                | 90 °                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| La luz se recibe solo por la superficie superior del ojo del sensor. | La luz se recibe por el borde del ojo, compensando para aumentar la reflexión desde la parte superior. | El borde del sensor comienza a bloquear parte de la luz, evitando golpear el borde. | La llanta bloquea completamente el ojo del sensor, manteniendo con una respuesta coseno adecuada |

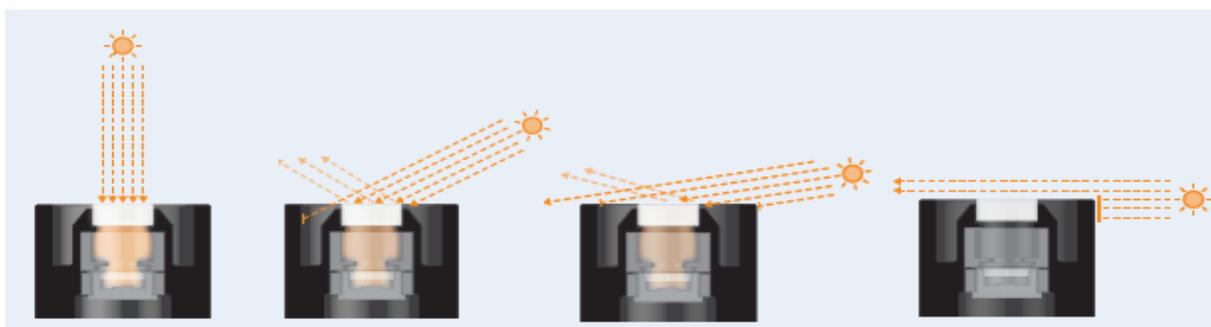


Figura 42. Comportamiento sensor con ángulos de incidencia de la luz.

**ANEXO II. DATOS ESTUDIO LED**

| DATOS PUNTO 1  |                                                                    |          |                                                                    |          |                                                                    |          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|
| Distancia (cm) | Potencia 0 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 1 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 2 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          |
|                | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 |
| 5              | 970,0                                                              | 968,2    | 2728                                                               | 2726     | 5875                                                               | 5839     |
| 10             | 547,7                                                              | 549,5    | 1675,5                                                             | 1674,4   | 3739                                                               | 3731     |
| 15             | 339,7                                                              | 339,9    | 924,9                                                              | 924,7    | 2124                                                               | 2121     |
| 20             | 234,4                                                              | 234      | 643,1                                                              | 643,3    | 1397                                                               | 1395,9   |
| 25             | 190,18                                                             | 190,12   | 515,7                                                              | 515,7    | 1153,9                                                             | 1155,1   |
| 30             | 167,17                                                             | 163,81   | 436,3                                                              | 436,3    | 959,5                                                              | 952,9    |
| 35             | 139,01                                                             | 139,26   | 380,1                                                              | 380,1    | 809,9                                                              | 808      |
| 40             | 120,79                                                             | 120,87   | 328,7                                                              | 328,7    | 701,8                                                              | 697,7    |
| 45             | 105,93                                                             | 105,72   | 286,5                                                              | 286,5    | 619,2                                                              | 596,9    |
| 50             | 95,64                                                              | 94,99    | 252,1                                                              | 252      | 536,7                                                              | 537,3    |
| 55             | 84,47                                                              | 84,31    | 224,5                                                              | 224,5    | 470                                                                | 470,4    |
| 60             | 75,52                                                              | 75,52    | 199,07                                                             | 199,04   | 422,5                                                              | 417,2    |
| 65             | 66,89                                                              | 66,8     | 177,35                                                             | 177,48   | 376,2                                                              | 376,2    |
| 70             | 58,95                                                              | 59,67    | 159,36                                                             | 159,34   | 337,2                                                              | 337,2    |
| 75             | 53,34                                                              | 53,36    | 146,39                                                             | 146,37   | 301,9                                                              | 301,9    |
| 80             | 47,84                                                              | 47,7     | 132,76                                                             | 132,71   | 283,5                                                              | 273,6    |
| 85             | 43,76                                                              | 43,7     | 119,37                                                             | 119,37   | 248,5                                                              | 247,1    |
| 90             | 39,7                                                               | 39,82    | 109,15                                                             | 109,1    | 225,2                                                              | 225,3    |
| 95             | 36,44                                                              | 36,3     | 100,34                                                             | 100,32   | 212,2                                                              | 204,2    |
| 100            | 33,37                                                              | 33,13    | 90,64                                                              | 90,64    | 195,59                                                             | 190,53   |

Tabla 14. Datos Placa LED – P1.

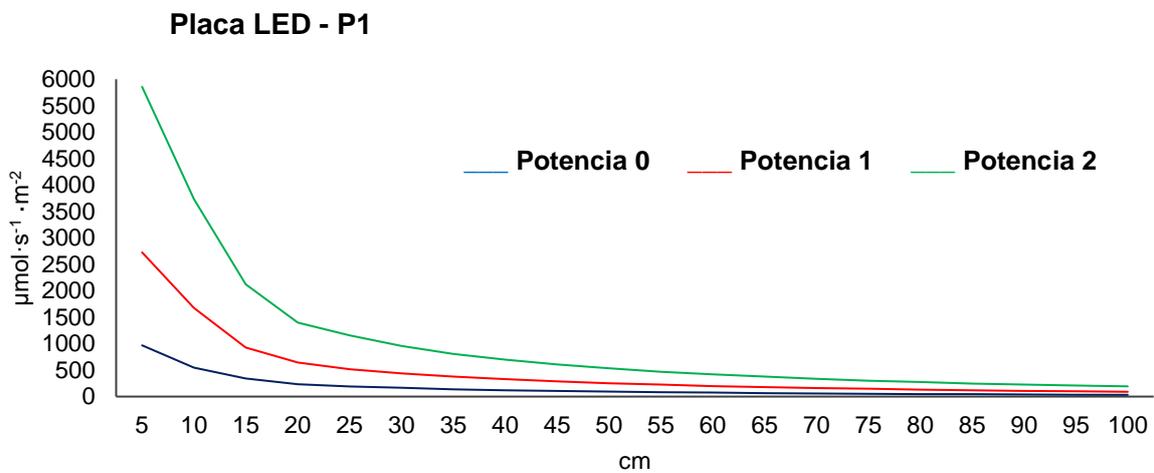


Figura 43. Gráfica de las intensidades de luz Punto 1 de la Placa LED.

| DATOS PUNTO 2  |                                                                    |          |                                                                    |          |                                                                    |          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|
| Distancia (cm) | Potencia 0 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 1 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 2 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          |
|                | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 |
| 5              | 208,4                                                              | 205,6    | 1124,2                                                             | 1121,7   | 2219                                                               | 2207     |
| 10             | 262,6                                                              | 262,3    | 866,8                                                              | 866      | 1757,3                                                             | 1755,4   |
| 15             | 251,9                                                              | 252      | 779                                                                | 786,8    | 1620,8                                                             | 1619,2   |
| 20             | 201,2                                                              | 201,2    | 686,4                                                              | 686      | 1330,8                                                             | 1330,8   |
| 25             | 160,27                                                             | 160,18   | 546,6                                                              | 546,6    | 1085,9                                                             | 1074,4   |
| 30             | 132,89                                                             | 133,03   | 479,6                                                              | 479,4    | 904,9                                                              | 904,7    |
| 35             | 114,46                                                             | 114,48   | 395,3                                                              | 394,3    | 776,3                                                              | 780,6    |
| 40             | 96,86                                                              | 96,92    | 333,5                                                              | 333,5    | 663,7                                                              | 662,7    |
| 45             | 84,04                                                              | 93,87    | 284,8                                                              | 284,5    | 555,3                                                              | 555,5    |
| 50             | 73,46                                                              | 73,5     | 245                                                                | 245      | 476,1                                                              | 469,3    |
| 55             | 65,24                                                              | 65,22    | 214,1                                                              | 213,9    | 409,8                                                              | 411,6    |
| 60             | 59,38                                                              | 59,4     | 193,99                                                             | 193,29   | 350,4                                                              | 348,1    |
| 65             | 51,72                                                              | 51,76    | 168,39                                                             | 168,5    | 316,6                                                              | 316,6    |
| 70             | 47,24                                                              | 47,26    | 151,05                                                             | 151,08   | 286,4                                                              | 288,6    |
| 75             | 43,88                                                              | 43,9     | 135,74                                                             | 141,69   | 262,2                                                              | 258,9    |
| 80             | 40,38                                                              | 40,36    | 119,95                                                             | 119,96   | 238,5                                                              | 240,2    |
| 85             | 36,65                                                              | 36,65    | 105,72                                                             | 100,4    | 222,8                                                              | 220,1    |
| 90             | 33,28                                                              | 33,41    | 93,72                                                              | 98,9     | 195,25                                                             | 199,62   |
| 95             | 30,98                                                              | 30,99    | 90,61                                                              | 92,7     | 187,62                                                             | 187,6    |
| 100            | 29,64                                                              | 29,59    | 87,87                                                              | 88,33    | 176,76                                                             | 175,67   |

Tabla 15. Datos Placa LED – P2.

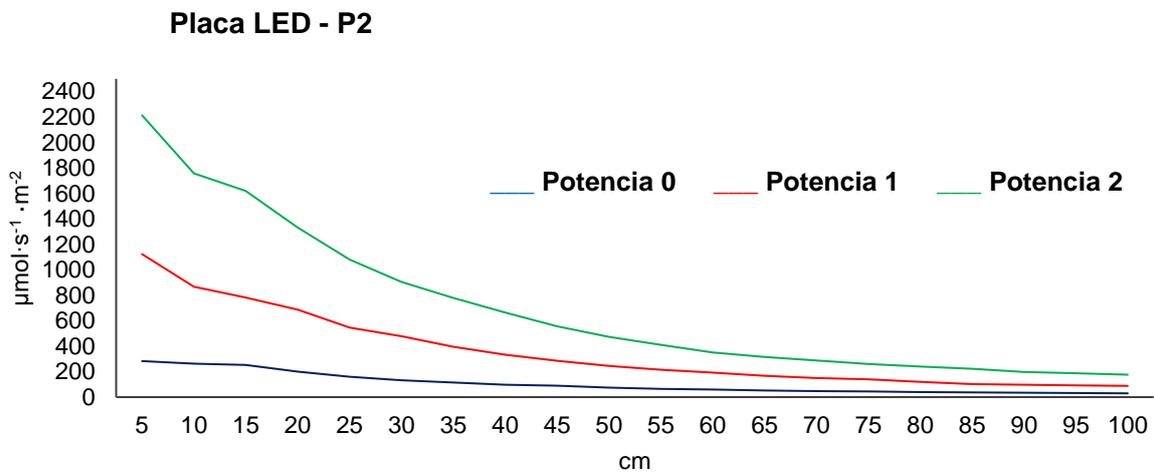


Figura 44. Gráfica de las intensidades de luz Punto 2 de la Placa LED.

| DATOS PUNTO 3  |                                                                    |          |                                                                    |          |                                                                    |          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|
| Distancia (cm) | Potencia 0 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 1 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 2 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          |
|                | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 |
| 5              | 743,7                                                              | 743,7    | 1796,4                                                             | 1794,2   | 4446                                                               | 4359     |
| 10             | 317,8                                                              | 317,6    | 749,3                                                              | 741,6    | 2028                                                               | 2049     |
| 15             | 271,4                                                              | 271,4    | 634                                                                | 633,8    | 1466,8                                                             | 1540,6   |
| 20             | 202,6                                                              | 229,2    | 550,5                                                              | 551,2    | 1407,2                                                             | 1352     |
| 25             | 183,98                                                             | 184,01   | 472,4                                                              | 472,6    | 1106,7                                                             | 1088,7   |
| 30             | 153,14                                                             | 153,16   | 389,3                                                              | 385,2    | 877,9                                                              | 875,3    |
| 35             | 127,72                                                             | 127,72   | 327,3                                                              | 327,3    | 719,6                                                              | 725,2    |
| 40             | 108,69                                                             | 108,69   | 277,9                                                              | 277,8    | 635,7                                                              | 634,2    |
| 45             | 93,48                                                              | 93,52    | 234,6                                                              | 234,6    | 566,4                                                              | 572,2    |
| 50             | 78,99                                                              | 79,01    | 208,1                                                              | 208,1    | 487,7                                                              | 486,4    |
| 55             | 70,35                                                              | 70,35    | 182,37                                                             | 182,37   | 377,2                                                              | 379,5    |
| 60             | 61,75                                                              | 61,55    | 159,36                                                             | 159,35   | 368,9                                                              | 360,9    |
| 65             | 54,62                                                              | 54,6     | 141,92                                                             | 141,92   | 324,6                                                              | 328,1    |
| 70             | 48,77                                                              | 48,79    | 119,82                                                             | 124,96   | 299,8                                                              | 298,7    |
| 75             | 42,85                                                              | 42,85    | 110,72                                                             | 110,7    | 269,2                                                              | 269,4    |
| 80             | 39,16                                                              | 39,14    | 103,04                                                             | 102,3    | 248,4                                                              | 242,2    |
| 85             | 36,14                                                              | 36,21    | 95,13                                                              | 95,14    | 214,7                                                              | 214,2    |
| 90             | 33,68                                                              | 33,68    | 87,36                                                              | 88,76    | 203,8                                                              | 205,4    |
| 95             | 30,29                                                              | 30,31    | 79,02                                                              | 79,01    | 186,71                                                             | 187,13   |
| 100            | 28,95                                                              | 29,95    | 72,74                                                              | 72,72    | 168,39                                                             | 165,33   |

Tabla 16. Datos Placa LED – P3.

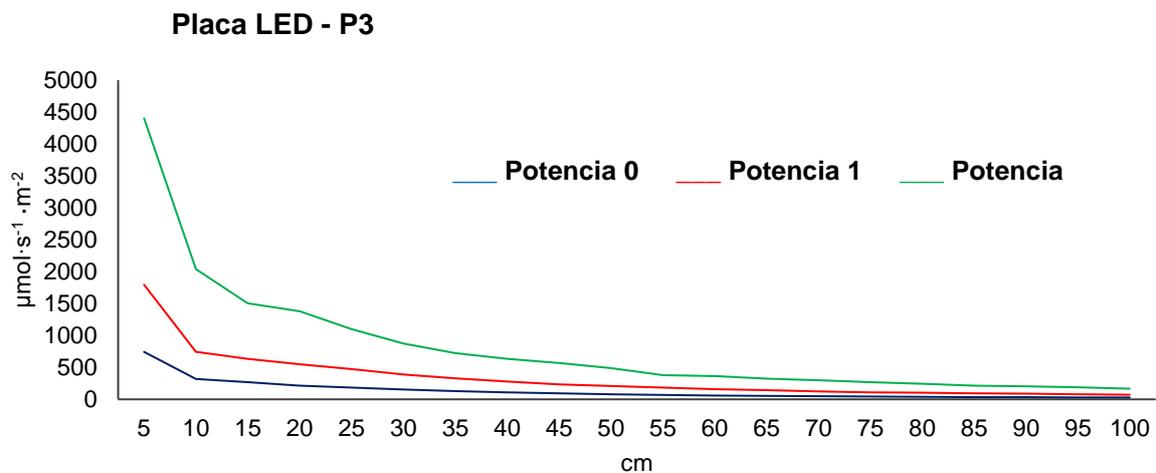


Figura 45. Gráfica de las intensidades de luz Punto 3 de la Placa LED.

| DATOS PUNTO 4  |                                                                    |          |                                                                    |          |                                                                    |          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|
| Distancia (cm) | Potencia 0 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 1 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          | Potencia 2 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |          |
|                | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 | Medida 1                                                           | Medida 2 |
| 5              | 551,8                                                              | 554,9    | 1269,3                                                             | 1270,2   | 4058                                                               | 3994     |
| 10             | 372                                                                | 372,6    | 1196,6                                                             | 1195,3   | 2648                                                               | 2647     |
| 15             | 326,5                                                              | 326,7    | 997,9                                                              | 997,7    | 2287                                                               | 2281     |
| 20             | 277,73                                                             | 278      | 847,2                                                              | 862,2    | 1835,2                                                             | 1829,7   |
| 25             | 235,9                                                              | 235,9    | 701,8                                                              | 701,6    | 1498,2                                                             | 1487     |
| 30             | 193,44                                                             | 193,5    | 601,5                                                              | 601,2    | 1124,6                                                             | 1111     |
| 35             | 159,73                                                             | 160,02   | 501,9                                                              | 502,1    | 926,1                                                              | 919,5    |
| 40             | 135,12                                                             | 135,1    | 419                                                                | 419      | 765,3                                                              | 762,7    |
| 45             | 101,89                                                             | 98,47    | 362,1                                                              | 361,7    | 655,5                                                              | 654,4    |
| 50             | 96,59                                                              | 98,24    | 310                                                                | 309,8    | 557,8                                                              | 558,2    |
| 55             | 74,49                                                              | 71,09    | 271                                                                | 271      | 404,15                                                             | 470,8    |
| 60             | 65,98                                                              | 63,94    | 234,4                                                              | 234,5    | 398,2                                                              | 413,1    |
| 65             | 63,84                                                              | 63,82    | 206,7                                                              | 205      | 370                                                                | 371,4    |
| 70             | 54,91                                                              | 55,03    | 183,29                                                             | 183,35   | 331,2                                                              | 331,8    |
| 75             | 49,51                                                              | 49,53    | 162,41                                                             | 162,68   | 283,4                                                              | 284,2    |
| 80             | 44,33                                                              | 44,33    | 144,7                                                              | 144,79   | 247,9                                                              | 257,9    |
| 85             | 40,44                                                              | 40,42    | 131,26                                                             | 131,74   | 236,1                                                              | 242,6    |
| 90             | 36,48                                                              | 36,56    | 120,09                                                             | 120,07   | 220,3                                                              | 219,9    |
| 95             | 33,66                                                              | 33,78    | 109,91                                                             | 110,16   | 199,52                                                             | 193,54   |
| 100            | 30,75                                                              | 30,8     | 100,36                                                             | 100,78   | 182,9                                                              | 182,9    |

Tabla 17. Datos Placa LED – P4.

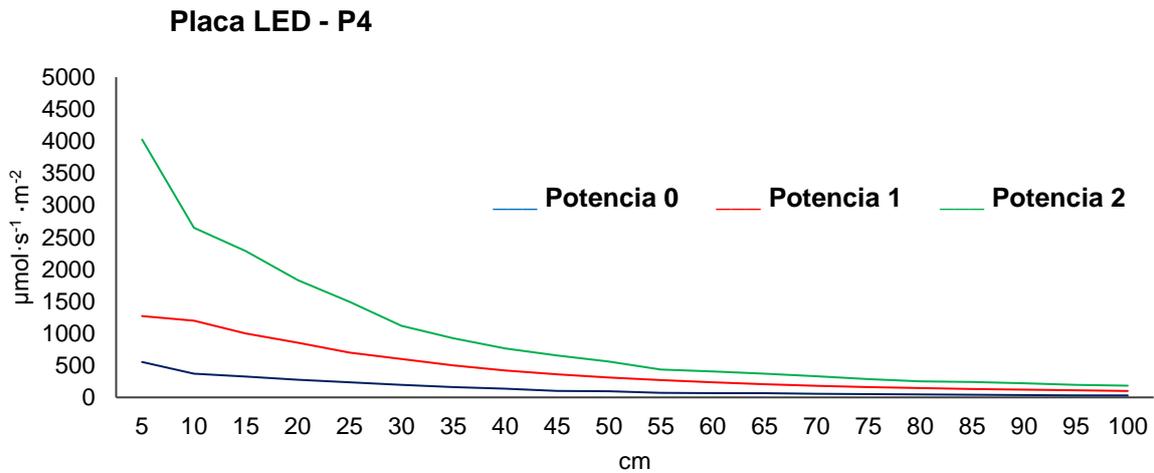


Figura 46. Gráfica de las intensidades de luz Punto 4 de la Placa LED.

**ANEXO III. BOLD'S BASAL MEDIUM**

Para la preparación del medio Bold's Basal en el laboratorio del Campus de Soria se han pesado y preparado las siguientes disoluciones:

- **SL 1:** se han disuelto 2,50 g NaNO<sub>3</sub> en 100 mL.
- **SL 2:** se han disuelto 0,75 g MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O en 100 mL.
- **SL 3:** se han disuelto 0,25 g NaCl en 100 mL.
- **SL 4:** se han disuelto 0,75 g K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> en 100 mL.
- **SL 5:** se han disuelto 1,75 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> en 100 mL.
- **SL 6:** se han disuelto 0,25 g CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O en 100 mL.
- **SL 7:** para Trace elements solution se ha disuelto en 1000 mL:
  - 8,82 g ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O.
  - 1,44 g MnCl<sub>2</sub>·4 H<sub>2</sub>O.
  - 0,71 g MoO<sub>3</sub>.
  - 1,57 g CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O.
  - 0,49 g Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O.
- **SL 8:** se han disuelto 1,14 g H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> en 100 mL.
- **SL 9:** para EDTA-KOH solution se han disuelto en 100 mL:
  - 5,0 g EDTA·Na<sub>2</sub>.
  - 3,1 g KOH.
- **SL 10:** para Ferric solution se han disuelto en 1000 L:
  - 4,98 g FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O.
  - 1 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado 1 mL.
- **SL Carbono:** se han disuelto 5,2125 g de NaHCO<sub>3</sub> en 100 mL.

El medio *Bold's Basal* contiene los nutrientes con las siguientes concentraciones:

| Stock Solution (SL)                      | Volumen | Compuesto                                            | Concentración SL         | Concentración Final        |
|------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <b>SL 1</b>                              | 10 mL   | NaNO <sub>3</sub>                                    | 2,50 g · 100 mL          | 12,94 x 10 <sup>-3</sup> M |
| <b>SL 2</b>                              | 10 mL   | MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | 0,75 g · 100 mL          | 13,04 x 10 <sup>-4</sup> M |
| <b>SL 3</b>                              | 10 mL   | NaCl                                                 | 0,25 · 100 mL            | 14,28 x 10 <sup>-4</sup> M |
| <b>SL 4</b>                              | 10 mL   | K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>                      | 0,75 · 100 mL            | 14,31 x 10 <sup>-4</sup> M |
| <b>SL 5</b>                              | 10 mL   | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                      | 1,75 g · 100 mL          | 11,29 x 10 <sup>-3</sup> M |
| <b>SL 6</b>                              | 10 mL   | CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                 | 0,25 g · 100 mL          | 11,70 x 10 <sup>-4</sup> M |
| <b>SL 7</b><br>(Trace elements solution) | 1 mL    | ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | 8,82 g · L <sup>-1</sup> | 3,07 x 10 <sup>-5</sup> M  |
|                                          |         | MnCl <sub>2</sub> ·4 H <sub>2</sub> O                | 1,44 g · L <sup>-1</sup> | 7,28 x 10 <sup>-6</sup> M  |
|                                          |         | MoO <sub>3</sub>                                     | 0,71 g · L <sup>-1</sup> | 4,93 x 10 <sup>-6</sup> M  |
|                                          |         | CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O                 | 1,57 g · L <sup>-1</sup> | 6,29 x 10 <sup>-6</sup> M  |
|                                          |         | Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O | 0,49 g · L <sup>-1</sup> | 1,68 x 10 <sup>-6</sup> M  |
| <b>SL 8</b>                              | 1 mL    | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                       | 1,14 g · 100 mL          | 11,85 x 10 <sup>-4</sup> M |
| <b>SL 9</b>                              | 1 mL    | EDTA·Na <sub>2</sub>                                 | 5,00 g · 100 mL          | 1,71 x 10 <sup>-4</sup> M  |
|                                          |         | KOH                                                  | 3,10 g · 100 mL          |                            |
| <b>SL 10</b><br>(Ferric solution)        | 1 mL    | FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | 4,98 g · 1000 L          | 1,79 x 10 <sup>-5</sup> M  |
|                                          |         | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                       | 1 mL · 1000 L            | 5,53 x 10 <sup>-4</sup> M  |
| <b>SL Carbono</b>                        | 100 mL  | NaHCO <sub>3</sub>                                   | 5,21 g · 100 mL          |                            |

Tabla 18. Datos Bold's Basal Medium.

**ANEXO IV. DATOS BOLD'S BASAL MEDIUM ABSORBANCIAS 550 y 680 NM**

| DATOS ABSORBANCIA 550 nm |        |        |        |        |        | DATOS CONCENTRACIÓN g/L ABS 550 nm |          |          |          |          |          |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| HORAS                    | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | HORAS                              | M1       | M2       | M3       | M4       | M5       |
| 0,00                     | 0,0435 | 0,0435 | 0,0425 | 0,0405 | 0,0405 | 0,00                               | 0,025558 | 0,025558 | 0,024879 | 0,023520 | 0,023520 |
| 11,13                    | 0,0585 | 0,0480 | 0,0485 | 0,0455 | 0,0415 | 11,13                              | 0,035751 | 0,028616 | 0,028956 | 0,026917 | 0,024199 |
| 24,00                    | 0,0705 | 0,0535 | 0,0645 | 0,0630 | 0,0555 | 24,00                              | 0,043905 | 0,032353 | 0,039828 | 0,038809 | 0,033712 |
| 32,83                    | 0,1455 | 0,1185 | 0,1225 | 0,0970 | 0,0790 | 32,83                              | 0,094867 | 0,076521 | 0,079239 | 0,061912 | 0,049681 |
| 48,63                    | 0,2095 | 0,1485 | 0,0808 | 0,1135 | 0,0865 | 48,63                              | 0,138355 | 0,096906 | 0,050870 | 0,073123 | 0,054777 |
| 56,63                    | 0,5065 | 0,3385 | 0,2345 | 0,1700 | 0,0960 | 56,63                              | 0,340167 | 0,226011 | 0,155343 | 0,111515 | 0,061232 |
| 72,63                    | 0,6305 | 0,4545 | 0,3170 | 0,1980 | 0,1090 | 72,63                              | 0,424425 | 0,304833 | 0,211402 | 0,130541 | 0,070066 |
| 78,96                    | 0,8890 | 0,6495 | 0,4100 | 0,2465 | 0,1220 | 78,96                              | 0,600076 | 0,437335 | 0,274595 | 0,163497 | 0,078899 |
| 83,38                    | 0,9735 | 0,7695 | 0,4860 | 0,2725 | 0,1425 | 83,38                              | 0,657493 | 0,518875 | 0,326237 | 0,181164 | 0,092829 |
| 96,05                    | 0,9760 | 0,8030 | 0,5055 | 0,3335 | 0,1665 | 96,05                              | 0,659192 | 0,541639 | 0,339487 | 0,222613 | 0,109137 |
| 102,63                   | 1,0355 | 0,9775 | 0,6335 | 0,3940 | 0,1875 | 102,63                             | 0,699622 | 0,660211 | 0,426463 | 0,263723 | 0,123406 |
| 109,13                   | 1,0995 | 1,0590 | 0,6980 | 0,4500 | 0,2120 | 109,13                             | 0,743110 | 0,715591 | 0,470291 | 0,301775 | 0,140054 |
| 122,13                   | 1,0995 | 1,0590 | 0,9690 | 0,6455 | 0,3260 | 122,13                             | 0,743110 | 0,715591 | 0,654436 | 0,434617 | 0,217517 |
| 152,13                   |        |        | 1,0750 | 0,8320 | 0,4025 | 152,13                             |          |          | 0,726463 | 0,561344 | 0,269499 |
| 180,63                   |        |        | 1,0720 | 0,9240 | 0,4640 | 180,63                             |          |          | 0,724424 | 0,623858 | 0,311288 |
| 202,13                   |        |        |        | 0,9405 | 0,4875 | 202,13                             |          |          |          | 0,635070 | 0,327256 |
| 228,13                   |        |        |        |        | 0,5820 | 228,13                             |          |          |          |          | 0,391469 |

Tabla 19. Datos Bold's Basal Medium absorbancias 550 nm.

| DATOS ABSORBANCIA 680 nm |        |        |        |        |        | DATOS CONCENTRACIÓN g/L ABS 680 nm |          |          |          |          |          |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| HORAS                    | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | HORAS                              | M1       | M2       | M3       | M4       | M5       |
| 0,00                     | 0,0480 | 0,0480 | 0,0505 | 0,0465 | 0,0475 | 0,00                               | 0,019876 | 0,019876 | 0,021250 | 0,019052 | 0,019601 |
| 11,13                    | 0,0695 | 0,0575 | 0,0595 | 0,0550 | 0,0530 | 11,13                              | 0,031690 | 0,025096 | 0,026195 | 0,023723 | 0,022624 |
| 24,00                    | 0,0865 | 0,0665 | 0,0815 | 0,0785 | 0,0695 | 24,00                              | 0,041032 | 0,030042 | 0,038284 | 0,036636 | 0,031690 |
| 32,83                    | 0,1645 | 0,1300 | 0,1380 | 0,1205 | 0,1035 | 32,83                              | 0,083893 | 0,064935 | 0,069331 | 0,059715 | 0,050373 |
| 48,63                    | 0,2610 | 0,2060 | 0,1935 | 0,1535 | 0,1215 | 48,63                              | 0,136920 | 0,106697 | 0,099828 | 0,077848 | 0,060264 |
| 56,63                    | 0,6045 | 0,3835 | 0,2965 | 0,2195 | 0,1365 | 56,63                              | 0,325673 | 0,204233 | 0,156427 | 0,114115 | 0,068507 |
| 72,63                    | 0,8335 | 0,6075 | 0,4345 | 0,2615 | 0,1520 | 72,63                              | 0,451508 | 0,327321 | 0,232258 | 0,137194 | 0,077024 |
| 78,96                    | 1,1670 | 0,8810 | 0,5560 | 0,3330 | 0,1650 | 78,96                              | 0,634767 | 0,477610 | 0,299022 | 0,176484 | 0,084168 |
| 83,38                    | 1,2500 | 1,0510 | 0,6355 | 0,3640 | 0,1895 | 83,38                              | 0,680375 | 0,571025 | 0,342707 | 0,193518 | 0,097630 |
| 96,05                    | 1,2415 | 1,1570 | 0,6880 | 0,4295 | 0,2225 | 96,05                              | 0,675704 | 0,629272 | 0,371556 | 0,229510 | 0,115764 |
| 102,63                   | 1,2130 | 1,3470 | 0,8245 | 0,5155 | 0,2435 | 102,63                             | 0,660044 | 0,733677 | 0,446563 | 0,276767 | 0,127303 |
| 109,13                   | 1,1860 | 1,4285 | 0,9405 | 0,5620 | 0,2690 | 109,13                             | 0,645207 | 0,778461 | 0,510305 | 0,302319 | 0,141316 |
| 122,13                   | 1,1860 | 1,4285 | 1,3535 | 0,8475 | 0,4090 | 122,13                             | 0,645207 | 0,778461 | 0,737248 | 0,459201 | 0,218246 |
| 152,13                   |        |        | 1,5435 | 1,1225 | 0,5190 | 152,13                             |          |          | 0,841653 | 0,610314 | 0,278691 |
| 180,63                   |        |        | 1,4300 | 1,2395 | 0,5905 | 180,63                             |          |          | 0,779285 | 0,674605 | 0,317980 |
| 202,13                   |        |        |        | 1,2660 | 0,6175 | 202,13                             |          |          |          | 0,689167 | 0,332816 |
| 228,13                   |        |        |        |        | 0,7320 | 228,13                             |          |          |          |          | 0,395734 |

Tabla 20. Datos Bold's Basal Medium absorbancias 680 nm.

**ANEXO V. CURVAS DILUCIÓN BOLD'S BASAL MEDIUM ABS 550 y 680 NM**

| VOLUMEN    |                |              | ABS 550 nm     |          |               | ABS 680 nm        |          |        |        |
|------------|----------------|--------------|----------------|----------|---------------|-------------------|----------|--------|--------|
| %          | Agua dst. (ml) | Alga (ml)    | Medida 1       | Medida 2 | Media         | Medida 1          | Medida 2 | Media  |        |
| 0,00%      | 2,00           | 0,00         | 0,000          | 0,000    | 0,000         | 0,000             | 0,000    | 0,000  |        |
| 2,50%      | 1,95           | 0,05         | 0,020          | 0,021    | 0,021         | 0,028             | 0,030    | 0,029  |        |
| 5,00%      | 1,90           | 0,10         | 0,045          | 0,042    | 0,044         | 0,058             | 0,056    | 0,057  |        |
| 10,00%     | 1,80           | 0,20         | 0,085          | 0,084    | 0,085         | 0,109             | 0,111    | 0,110  |        |
| 20,00%     | 1,60           | 0,40         | 0,188          | 0,189    | 0,189         | 0,240             | 0,243    | 0,242  |        |
| 40,00%     | 1,20           | 0,80         | 0,372          | 0,370    | 0,371         | 0,470             | 0,468    | 0,469  |        |
| 60,00%     | 0,80           | 1,20         | 0,516          | 0,510    | 0,513         | 0,607             | 0,611    | 0,609  |        |
| 80,00%     | 0,40           | 1,60         | 0,712          | 0,708    | 0,710         | 0,872             | 0,864    | 0,868  |        |
| 100,00%    | 0,00           | 2,00         | 0,836          | 0,829    | 0,833         | 1,061             | 1,059    | 1,060  |        |
| Masa       | Filtros (g)    | Filtrado (g) | Diferencia (g) |          | Volumen F (L) | Concentración g/L |          |        |        |
| filtro 1   | 11,5142        | 11,5432      | 0,0290         |          | 0,050         | 0,5800            |          |        |        |
| Alga (g/L) | 0,000          | 0,015        | 0,029          | 0,058    | 0,116         | 0,232             | 0,348    | 0,464  | 0,580  |
| ABS 550 nm | 0,0000         | 0,0205       | 0,0435         | 0,0845   | 0,1885        | 0,3710            | 0,5130   | 0,7100 | 0,8325 |
| ABS 680 nm | 0,0139         | 0,0290       | 0,0570         | 0,1100   | 0,2415        | 0,4690            | 0,6090   | 0,8680 | 1,0600 |

Tabla 21. Curvas dilución Bold's Basal Medium ABS 550 y 680 nm.

**Concentración & ABS 550 nm**

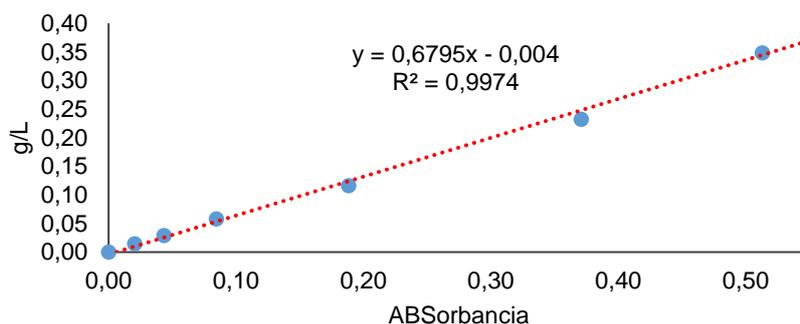


Figura 47. Gráfica curva dilución BBM - ABS 550 nm.

**Concentración & ABS 680 nm**

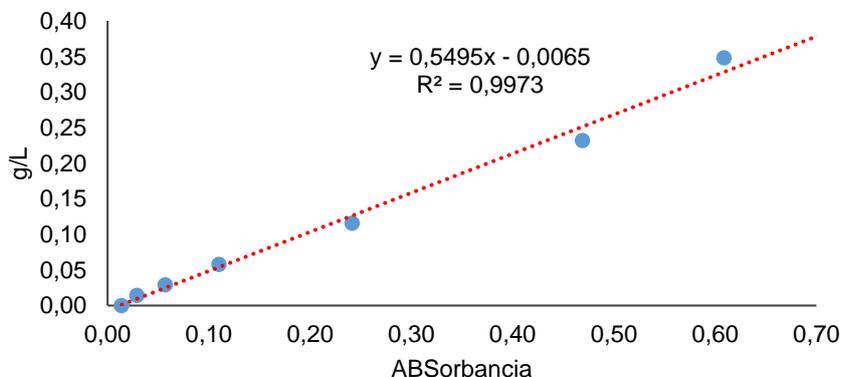


Figura 48. Gráfica curva dilución BBM -ABS 680 nm.

## ANEXO VI. DATOS EDAR MEDINACELI

La EDAR dispone de los siguientes elementos en su línea de agua:

- Desbaste previo: Consistente en una reja de desbaste con una luz de paso de 40 mm, para la retención de gruesos.
- Bombeo del agua hasta el tamiz mediante tres bombas (1 de reserva).
- Tamizado de aguas: un tamiz rotativo con una luz de paso de 0,5 mm para permitir el tamizado del vertido. La compactación de los residuos retenidos en el tamiz se realiza mediante un tornillo compactador de residuos sin núcleo.
- Un reactor biológico de fangos activos en aireación prolongada con un único decantador secundario posterior. El reactor es de corona circular, con un diámetro mayor de 13,4 m, un diámetro menor de 7,6 m y una altura útil de 4,0 m, con un volumen total de 382,60 m<sup>3</sup>.
- Un decantador, donde las partículas en coagulación sedimentan.
- Arqueta de vaciado del reactor biológico y decantador.
- Arqueta de bombeo para recirculación de fangos al reactor biológico y un bombeo al decantador centrífugo.

La línea de fangos cuenta con una deshidratación que consta de dos etapas:

- Floculación mediante polielectrolito: Un equipo de preparación de polielectrolito, con una capacidad de 400 l, para preparación, maduración y trasiego del poli.
- Deshidratación mediante decantador centrífugo: El fango floculado se introduce en el decantador centrífugo con unas bombas mono con una capacidad de 1,5 m<sup>3</sup>/h y sin espesador.

El agua residual que se ha utilizado en el presente TFM se ha recogido después del desbaste y tamizado. Se adjunta un esquema del funcionamiento de la EDAR.

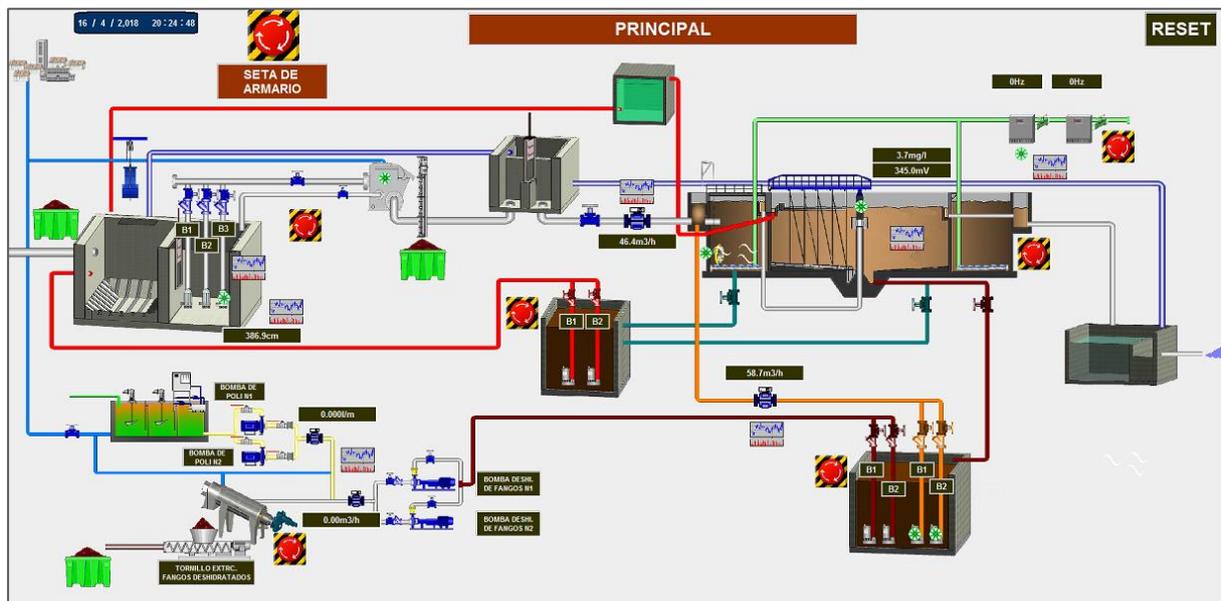


Figura 49. Esquema funcionamiento EDAR Medinaceli – SCADA.

**ANEXO VII. DATOS AGUA RESIDUAL ABORBANCIAS 550 y 680 NM**

| DATOS ABSORBANCIA 550 nm |        |        |        |        |        | DATOS CONCENTRACIÓN g/L ABS 550 nm |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| HORAS                    | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | HORAS                              | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     |
| 0,0                      | 0,0720 | 0,0750 | 0,0815 | 0,0645 | 0,0750 | 0,0                                | 0,0486 | 0,0504 | 0,0543 | 0,0441 | 0,0504 |
| 24,0                     | 0,4625 | 0,4465 | 0,3745 | 0,3770 | 0,2215 | 24,0                               | 0,2829 | 0,2733 | 0,2301 | 0,2316 | 0,1383 |
| 49,5                     | 0,6645 | 0,5620 | 0,5925 | 0,6270 | 0,3475 | 49,5                               | 0,4041 | 0,3426 | 0,3609 | 0,3816 | 0,2139 |
| 56,0                     | 0,6655 | 0,6485 | 0,6360 | 0,7000 | 0,3820 | 56,0                               | 0,4047 | 0,3945 | 0,3870 | 0,4254 | 0,2346 |
| 74,0                     | 0,6835 | 0,6865 | 0,6845 | 0,7375 | 0,3930 | 74,0                               | 0,4155 | 0,4173 | 0,4161 | 0,4479 | 0,2412 |
| 82,5                     | 0,7235 | 0,6995 | 0,7020 | 0,7810 | 0,4380 | 82,5                               | 0,4395 | 0,4251 | 0,4266 | 0,4740 | 0,2682 |
| 89,5                     | 0,7295 | 0,7005 | 0,7350 | 0,8395 | 0,4620 | 89,5                               | 0,4431 | 0,4257 | 0,4464 | 0,5091 | 0,2826 |
| 95,5                     | 0,7335 | 0,7310 | 0,7165 | 0,8505 | 0,4760 | 95,5                               | 0,4455 | 0,4440 | 0,4353 | 0,5157 | 0,2910 |
| 191,5                    | 0,7570 | 0,7305 | 0,8315 | 0,8030 | 0,5225 | 191,5                              | 0,4596 | 0,4437 | 0,5043 | 0,4872 | 0,3189 |

Tabla 22. Datos agua residual Absorbancias 550 nm.

| DATOS ABSORBANCIA 680 nm |        |        |        |        |        | DATOS CONCENTRACIÓN g/L ABS 680 nm |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| HORAS                    | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | HORAS                              | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     |
| 0,0                      | 0,0885 | 0,0895 | 0,0975 | 0,0795 | 0,0985 | 0,0                                | 0,0516 | 0,0522 | 0,0568 | 0,0465 | 0,0573 |
| 24,0                     | 0,3995 | 0,3805 | 0,3100 | 0,2980 | 0,1440 | 24,0                               | 0,2289 | 0,2181 | 0,1779 | 0,1711 | 0,0833 |
| 49,5                     | 0,6975 | 0,6050 | 0,6575 | 0,6520 | 0,3535 | 49,5                               | 0,3988 | 0,3461 | 0,3760 | 0,3728 | 0,2027 |
| 56,0                     | 0,7070 | 0,6465 | 0,6690 | 0,7285 | 0,3685 | 56,0                               | 0,4042 | 0,3697 | 0,3825 | 0,4164 | 0,2112 |
| 74,0                     | 0,7210 | 0,6800 | 0,7365 | 0,8205 | 0,4095 | 74,0                               | 0,4122 | 0,3888 | 0,4210 | 0,4689 | 0,2346 |
| 82,5                     | 0,7895 | 0,7075 | 0,7465 | 0,8420 | 0,4515 | 82,5                               | 0,4512 | 0,4045 | 0,4267 | 0,4811 | 0,2586 |
| 89,5                     | 0,8230 | 0,7700 | 0,7885 | 0,8755 | 0,5005 | 89,5                               | 0,4703 | 0,4401 | 0,4506 | 0,5002 | 0,2865 |
| 95,5                     | 0,7665 | 0,7515 | 0,7750 | 0,8990 | 0,5015 | 95,5                               | 0,4381 | 0,4296 | 0,4430 | 0,5136 | 0,2871 |
| 191,5                    | 0,8080 | 0,7505 | 0,8270 | 0,8305 | 0,5890 | 191,5                              | 0,4618 | 0,4290 | 0,4726 | 0,4746 | 0,3369 |

Tabla 23. Datos agua residual Absorbancias 680 nm.

**ANEXO VIII. CURVAS DILUCIÓN AGUA RESIDUAL ABS 550 y 680 NM**

| VOLUMEN           |                |              | ABS 550 nm     |               |                   | ABS 680 nm |          |       |
|-------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|-------------------|------------|----------|-------|
| %                 | Agua dst. (ml) | Alga (ml)    | Medida 1       | Medida 2      | Media             | Medida 1   | Medida 2 | Media |
| 0,00%             | 2,00           | 0,00         | 0,000          | 0,000         | 0,000             | 0,000      | 0,000    | 0,000 |
| 25,00%            | 1,50           | 0,50         | 0,149          | 0,154         | 0,152             | 0,172      | 0,168    | 0,170 |
| 50,00%            | 1,00           | 1,00         | 0,302          | 0,306         | 0,304             | 0,341      | 0,337    | 0,339 |
| 75,00%            | 0,50           | 1,50         | 0,465          | 0,468         | 0,467             | 0,495      | 0,492    | 0,494 |
| 100,00%           | 0,00           | 2,00         | 0,649          | 0,650         | 0,650             | 0,690      | 0,686    | 0,688 |
| Masa              | Filtros (g)    | Filtrado (g) | Diferencia (g) | Volumen F (L) | Concentración g/L |            |          |       |
| filtro 1          | 22,6005        | 22,6102      | 0,0097         | 0,025         | 0,3880            |            |          |       |
| filtro 2          | 22,6451        | 22,6548      | 0,0097         | 0,025         | 0,3880            |            |          |       |
| <b>Alga (g/L)</b> | 0,000          | 0,097        | 0,194          | 0,291         | 0,388             |            |          |       |
| <b>ABS 550 nm</b> | 0,0000         | 0,1515       | 0,3040         | 0,4665        | 0,6495            |            |          |       |
| <b>ABS 680 nm</b> | 0,0000         | 0,1700       | 0,3390         | 0,4935        | 0,6880            |            |          |       |

Tabla 24. Curvas dilución agua residual ABS 550 y 680 nm.

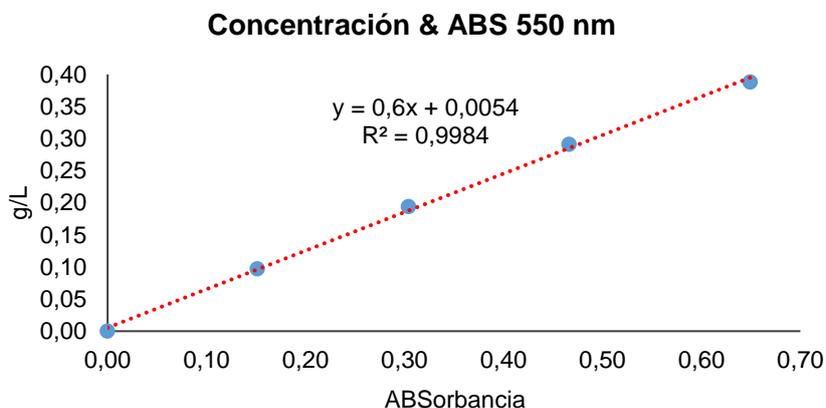


Figura 50. Gráfica curva dilución AR -ABS 550 nm.

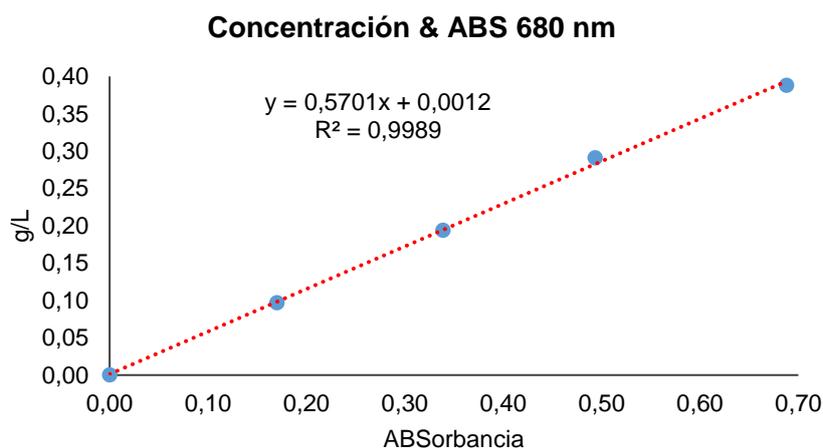


Figura 51. Gráfica curva dilución AR -ABS 680 nm.

## ANEXO IX. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR

### EQUIPO DE ALIMENTACIÓN DE AGUA RESIDUAL AL FOTOBIORREACTOR

| Modelo       | Imagen                                                                            | Capacidad                                | Características                                                                                                                     |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P-131-398-T1 |  | 0,024 – 1,6 L/hora<br>0,576 – 38,4 L/día | 60 strokes(Golpes)/minuto como máximo, con un mínimo ajustable.<br>Compatible con sustancias ácidas y alcalinas.<br>Cabezal en PVC. |

Tabla 25. Equipo de alimentación de agua residual al fotobiorreactor.

### EQUIPO DE EXTRACCIÓN DEL LICOR MEZCLA DEL FOTOBIORREACTOR

| Modelo                       | Imagen                                                                             | Capacidad/características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Watson Marlow 520 serie ip31 |  | Tasas de flujo de hasta 3,500 ml/min con presión hasta 30 psi (2 bar), un 2,200: 1 control de velocidad de 0.1 a 220 rpm en 0.1 rpm.<br>Presentan 520 pumphead® de baja presión que utiliza rodillos de resorte y ofrece grandes volúmenes barridos. Además, cada modelo presenta un memomose, que ofrece una dosis exacta. Pueden ser controlados digital o remotamente a través de 21 pines D-conectores. Las pistas y el rotor son resistentes a los productos químicos y están hechos de sulfuro de polifenileno, mientras los rodillos y rodamientos están hechos de acero inoxidable. El rotor está agarrado, ofreciendo carga de tubo rápido. Las bombas contienen un protector resistente, y funcionan con tensiones de 115 V/230 V, 50Hz/60Hz. |

Tabla 26. Equipo de extracción del licor mezcla del fotobiorreactor.

### EQUIPO DE MEDICIÓN OXÍGENO DISUELTUO Y PH

| Modelo | Características                                                                                                                                                                                                                                                     | Imagen                                                                               |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| c3010  | pH: 1...14 pH<br>mV: ±2.000 mV<br>Ion: 0,01...100 g/l<br>Conductividad: 0...2.000 mS/cm<br>Resistencia: 0...200 MΩ.cm<br>Salinidad: 0,0...70,0<br>TDS: 0...100 g/l<br>Oxígeno Disuelto: 0...60 mg/l<br>Presión de Aire: 600...1.300 hPa<br>Temperatura: -5...+105°C |  |

Tabla 27. Equipo de medición oxígeno disuelto y pH.

**ANEXO X. DATOS CURVAS BOLD'S BASAL ABSORBANCIA 550 NM**

**MUESTRA 1 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 25,6                  | 25,558                                                                     | 0,000                               | 209441,242                         |
| 11,13          | 35,8                  | 45,934                                                                     | 103,700                             | 210977,759                         |
| 24,00          | 43,9                  | 87,910                                                                     | 1936,493                            | 198964,675                         |
| 32,83          | 94,9                  | 133,287                                                                    | 1476,042                            | 185257,376                         |
| 48,63          | 138,4                 | 255,290                                                                    | 13673,774                           | 115026,576                         |
| 56,63          | 340,2                 | 333,519                                                                    | 44,189                              | 82377,877                          |
| 72,63          | 424,4                 | 493,018                                                                    | 4705,052                            | 22932,428                          |
| 78,96          | 600,1                 | 547,396                                                                    | 2775,106                            | 12281,793                          |
| 83,38          | 657,5                 | 580,530                                                                    | 5923,303                            | 7880,389                           |
| 96,05          | 659,2                 | 652,395                                                                    | 46,196                              | 716,636                            |
| 102,63         | 699,6                 | 677,612                                                                    | 484,469                             | 24,010                             |
| 109,13         | 743,1                 | 696,127                                                                    | 2207,426                            | 166,808                            |
| 122,13         | 743,1                 | 719,437                                                                    | 560,412                             | 1472,889                           |
| 152,13         | 743,1                 | 738,480                                                                    | 21,440                              | 4237,561                           |
| 180,63         | 743,1                 | 742,147                                                                    | 0,928                               | 7231,411                           |
| 202,13         | 743,1                 | 742,816                                                                    | 0,086                               | 13008,100                          |
| 228,13         | 743,1                 | 743,040                                                                    | 0,005                               | 29344,924                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 400,433                                                                    | 33958,622                           | 1101342,456                        |
| X <sub>o</sub> | 25,6 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 743,1 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,055 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9692                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 28. Datos curva M1 BBM Absorbancia 550 nm.

**MUESTRA 2 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 25,6                  | 25,558                                                                     | 0,000                               | 162913,309                         |
| 11,13          | 28,6                  | 42,427                                                                     | 190,737                             | 164083,695                         |
| 24,00          | 32,4                  | 74,689                                                                     | 1792,342                            | 158505,051                         |
| 32,83          | 76,5                  | 107,959                                                                    | 988,361                             | 153193,236                         |
| 48,63          | 96,9                  | 196,244                                                                    | 9868,171                            | 109607,806                         |
| 56,63          | 226,0                 | 255,019                                                                    | 841,483                             | 88662,815                          |
| 72,63          | 304,8                 | 388,673                                                                    | 7029,181                            | 35691,792                          |
| 78,96          | 437,3                 | 441,269                                                                    | 15,471                              | 23562,846                          |
| 83,38          | 518,9                 | 475,994                                                                    | 1838,784                            | 17989,907                          |
| 96,05          | 541,6                 | 561,318                                                                    | 387,294                             | 4058,368                           |
| 102,63         | 660,2                 | 595,966                                                                    | 4127,398                            | 1370,506                           |
| 109,13         | 715,6                 | 623,796                                                                    | 8426,243                            | 209,655                            |
| 122,13         | 715,6                 | 663,142                                                                    | 2750,882                            | 504,138                            |
| 152,13         | 715,6                 | 702,334                                                                    | 175,725                             | 4374,017                           |
| 180,63         | 715,6                 | 712,145                                                                    | 11,874                              | 8552,682                           |
| 202,13         | 715,6                 | 714,353                                                                    | 1,532                               | 15754,154                          |
| 228,13         | 715,6                 | 715,232                                                                    | 0,128                               | 35778,933                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 38445,606                           | 984812,910                         |
| X <sub>o</sub> | 25,6 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 715,6 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,048 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9610                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 29. Datos curva M2 BBM Absorbancia 550 nm.

**MUESTRA 3 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 24,9                  | 24,879                                                                     | 0,000                               | 108496,573                         |
| 11,13          | 29,0                  | 36,895                                                                     | 63,030                              | 108803,935                         |
| 24,00          | 39,8                  | 57,584                                                                     | 315,294                             | 108755,459                         |
| 32,83          | 79,2                  | 77,436                                                                     | 3,250                               | 110167,229                         |
| 48,63          | 50,9                  | 128,025                                                                    | 5952,956                            | 93045,577                          |
| 56,63          | 155,3                 | 162,232                                                                    | 47,457                              | 86607,352                          |
| 72,63          | 211,4                 | 248,331                                                                    | 1363,793                            | 54156,779                          |
| 78,96          | 274,6                 | 287,849                                                                    | 175,664                             | 45947,785                          |
| 83,38          | 326,2                 | 316,663                                                                    | 91,671                              | 42839,103                          |
| 96,05          | 339,5                 | 401,306                                                                    | 3821,509                            | 21120,908                          |
| 102,63         | 426,5                 | 444,227                                                                    | 315,552                             | 14538,383                          |
| 109,13         | 470,3                 | 484,416                                                                    | 199,524                             | 9527,904                           |
| 122,13         | 654,4                 | 554,955                                                                    | 9896,372                            | 1878,423                           |
| 152,13         | 726,5                 | 659,234                                                                    | 4519,708                            | 2732,132                           |
| 180,63         | 724,4                 | 701,510                                                                    | 525,055                             | 11580,652                          |
| 202,13         | 724,4                 | 714,973                                                                    | 89,316                              | 24632,666                          |
| 228,13         | 724,4                 | 722,024                                                                    | 5,760                               | 58792,955                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 237,079                             | 27385,910                          |
| X <sub>o</sub> | 24,9 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 726,5 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,037 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9697                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 30. Datos curva M3 BBM Absorbancia 550 nm.

**MUESTRA 4 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 23,5                  | 23,520                                                                     | 0,000                               | 58685,157                          |
| 11,13          | 26,9                  | 32,538                                                                     | 31,591                              | 58105,591                          |
| 24,00          | 38,8                  | 47,019                                                                     | 67,415                              | 58387,639                          |
| 32,83          | 61,9                  | 60,172                                                                     | 3,025                               | 59824,886                          |
| 48,63          | 73,1                  | 92,024                                                                     | 357,229                             | 52996,909                          |
| 56,63          | 111,5                 | 112,929                                                                    | 1,999                               | 51535,421                          |
| 72,63          | 130,5                 | 165,451                                                                    | 1218,683                            | 37407,442                          |
| 78,96          | 163,5                 | 190,133                                                                    | 709,471                             | 34711,696                          |
| 83,38          | 181,2                 | 208,558                                                                    | 750,469                             | 34788,235                          |
| 96,05          | 222,6                 | 265,761                                                                    | 1861,692                            | 22511,374                          |
| 102,63         | 263,7                 | 297,181                                                                    | 1119,428                            | 18871,168                          |
| 109,13         | 301,8                 | 328,620                                                                    | 720,637                             | 15764,855                          |
| 122,13         | 434,6                 | 390,254                                                                    | 1968,109                            | 7199,579                           |
| 152,13         | 561,3                 | 507,534                                                                    | 2895,549                            | 238,994                            |
| 180,63         | 623,9                 | 574,532                                                                    | 2433,030                            | 7451,630                           |
| 202,13         | 635,1                 | 602,135                                                                    | 1084,700                            | 20363,236                          |
| 228,13         | 635,1                 | 619,730                                                                    | 235,305                             | 53659,331                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 156,440                             | 15458,331                          |
| X <sub>o</sub> | 23,5 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 635,1 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,030 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9739                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 31. Datos curva M4 BBM Absorbancia 550 nm.

**MUESTRA 5 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 23,5                  | 23,520                                                                     | 0,000                               | 14618,521                          |
| 11,13          | 24,2                  | 29,551                                                                     | 28,646                              | 14012,480                          |
| 24,00          | 33,7                  | 38,276                                                                     | 20,829                              | 13700,242                          |
| 32,83          | 49,7                  | 45,527                                                                     | 17,249                              | 13829,776                          |
| 48,63          | 54,8                  | 61,477                                                                     | 44,889                              | 12111,166                          |
| 56,63          | 61,2                  | 71,155                                                                     | 98,468                              | 11845,654                          |
| 72,63          | 70,1                  | 93,966                                                                     | 571,222                             | 9043,418                           |
| 78,96          | 78,9                  | 104,265                                                                    | 643,436                             | 8731,552                           |
| 83,38          | 92,8                  | 111,869                                                                    | 362,530                             | 9059,825                           |
| 96,05          | 109,1                 | 135,389                                                                    | 689,192                             | 6763,217                           |
| 102,63         | 123,4                 | 148,477                                                                    | 628,545                             | 6309,252                           |
| 109,13         | 140,1                 | 161,862                                                                    | 475,608                             | 5989,624                           |
| 122,13         | 217,5                 | 189,506                                                                    | 784,623                             | 3924,773                           |
| 152,13         | 269,5                 | 252,417                                                                    | 291,795                             | 150,473                            |
| 180,63         | 311,3                 | 302,455                                                                    | 78,029                              | 1204,399                           |
| 202,13         | 327,3                 | 330,799                                                                    | 12,550                              | 5567,677                           |
| 228,13         | 391,5                 | 354,745                                                                    | 1348,650                            | 18461,051                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 83,002                              | 6096,262                           |
| X <sub>o</sub> | 23,5 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 391,5 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,022 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9608                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 32. Datos curva M5 BBM Absorbancia 550 nm.

**ANEXO XI. DATOS CURVAS BOLD'S BASAL ABORBANCIA 680 NM**

**MUESTRA 1 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 19,9                  | 19,876                                                                     | 0,000                               | 179389,834                         |
| 11,13          | 31,7                  | 39,143                                                                     | 55,537                              | 181297,451                         |
| 24,00          | 41,0                  | 82,501                                                                     | 1719,708                            | 167316,753                         |
| 32,83          | 83,9                  | 132,043                                                                    | 2318,467                            | 149591,954                         |
| 48,63          | 136,9                 | 266,562                                                                    | 16807,237                           | 78332,080                          |
| 56,63          | 325,7                 | 348,135                                                                    | 504,560                             | 48327,373                          |
| 72,63          | 451,5                 | 493,298                                                                    | 1746,386                            | 8647,435                           |
| 78,96          | 634,8                 | 535,105                                                                    | 9932,353                            | 3556,702                           |
| 83,38          | 661,1                 | 558,492                                                                    | 10537,064                           | 1782,099                           |
| 96,05          | 675,7                 | 603,408                                                                    | 5226,820                            | 3,961                              |
| 102,63         | 660,0                 | 617,096                                                                    | 1844,495                            | 131,088                            |
| 109,13         | 645,2                 | 626,348                                                                    | 355,661                             | 498,946                            |
| 122,13         | 645,2                 | 636,830                                                                    | 70,172                              | 1335,323                           |
| 152,13         | 645,2                 | 643,954                                                                    | 1,570                               | 2598,381                           |
| 180,63         | 645,2                 | 645,003                                                                    | 0,042                               | 4194,720                           |
| 202,13         | 645,2                 | 645,155                                                                    | 0,003                               | 7483,614                           |
| 228,13         | 645,2                 | 645,197                                                                    | 0,000                               | 16849,040                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 400,433                                                                    | 385,589                             | 51120,075                          |
| X <sub>o</sub> | 19,9 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 645,2 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,064 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9400                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 33. Datos curva M1 BBM Absorbancia 680 nm.

**MUESTRA 2 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 19,9                  | 19,876                                                                     | 0,000                               | 197930,554                         |
| 11,13          | 25,1                  | 34,850                                                                     | 95,145                              | 202705,726                         |
| 24,00          | 30,0                  | 65,459                                                                     | 1254,412                            | 200487,985                         |
| 32,83          | 64,9                  | 98,953                                                                     | 1157,209                            | 197239,095                         |
| 48,63          | 106,7                 | 194,231                                                                    | 7662,118                            | 144826,612                         |
| 56,63          | 204,2                 | 261,196                                                                    | 3244,701                            | 117559,722                         |
| 72,63          | 327,3                 | 418,879                                                                    | 8382,780                            | 45692,941                          |
| 78,96          | 477,6                 | 481,508                                                                    | 15,202                              | 29091,391                          |
| 83,38          | 571,0                 | 522,616                                                                    | 2343,368                            | 21465,336                          |
| 96,05          | 629,3                 | 621,511                                                                    | 60,229                              | 4082,558                           |
| 102,63         | 733,7                 | 660,235                                                                    | 5393,648                            | 1099,417                           |
| 109,13         | 778,5                 | 690,427                                                                    | 7749,869                            | 59,319                             |
| 122,13         | 778,5                 | 731,190                                                                    | 2234,510                            | 1009,792                           |
| 152,13         | 778,5                 | 768,103                                                                    | 107,292                             | 5631,766                           |
| 180,63         | 778,5                 | 776,100                                                                    | 5,575                               | 10363,936                          |
| 202,13         | 778,5                 | 777,691                                                                    | 0,592                               | 18859,413                          |
| 228,13         | 778,5                 | 778,263                                                                    | 0,039                               | 42669,455                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 365,131                             | 39706,688                          |
| X <sub>o</sub> | 19,9 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 778,5 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,052 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9680                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 34. Datos curva M2 BBM Absorbancia 680 nm.

**MUESTRA 3 (BBM)**

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 21,2                  | 21,250                                                       | 0,000            | 137676,942      |
| 11,13      | 26,2                  | 32,257                                                       | 36,749           | 139841,347      |
| 24,00      | 38,3                  | 51,809                                                       | 182,921          | 142713,200      |
| 32,83      | 69,3                  | 71,140                                                       | 3,272            | 147170,562      |
| 48,63      | 99,8                  | 122,423                                                      | 510,526          | 129417,866      |
| 56,63      | 156,4                 | 158,499                                                      | 4,295            | 123442,440      |
| 72,63      | 232,3                 | 253,519                                                      | 452,032          | 81568,920       |
| 78,96      | 299,0                 | 298,919                                                      | 0,011            | 70844,458       |
| 83,38      | 342,7                 | 332,658                                                      | 100,981          | 67103,634       |
| 96,05      | 371,6                 | 434,542                                                      | 3967,285         | 34574,528       |
| 102,63     | 446,6                 | 487,582                                                      | 1682,546         | 24381,524       |
| 109,13     | 510,3                 | 537,930                                                      | 763,154          | 16410,632       |
| 122,13     | 737,2                 | 627,479                                                      | 12049,375        | 3588,735        |
| 152,13     | 841,7                 | 760,409                                                      | 6600,659         | 3726,241        |
| 180,63     | 779,3                 | 812,843                                                      | 1126,119         | 16573,363       |
| 202,13     | 779,3                 | 828,873                                                      | 2458,996         | 35224,033       |
| 228,13     | 779,3                 | 836,937                                                      | 3323,788         | 83859,494       |
| TOTAL SUMA |                       | 336,926                                                      | 257,767          | 33262,709       |
| $X_o$      | 21,2 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 841,7 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,039 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado.         |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9636                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 35. Datos curva M3 BBM Absorbancia 680 nm.

**MUESTRA 4 (BBM)**

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 19,1                  | 19,052                                                       | 0,000            | 67927,553       |
| 11,13      | 23,7                  | 27,092                                                       | 11,356           | 68119,761       |
| 24,00      | 36,6                  | 40,446                                                       | 14,519           | 69672,864       |
| 32,83      | 59,7                  | 52,953                                                       | 45,715           | 72385,718       |
| 48,63      | 77,8                  | 84,409                                                       | 43,040           | 65950,466       |
| 56,63      | 114,1                 | 105,788                                                      | 69,350           | 65118,798       |
| 72,63      | 137,2                 | 161,508                                                      | 591,146          | 48721,307       |
| 78,96      | 176,5                 | 188,508                                                      | 144,587          | 45708,356       |
| 83,38      | 193,5                 | 208,947                                                      | 238,041          | 46111,544       |
| 96,05      | 229,5                 | 273,660                                                      | 1949,176         | 30235,090       |
| 102,63     | 276,8                 | 309,843                                                      | 1094,033         | 25419,203       |
| 109,13     | 302,3                 | 346,367                                                      | 1940,231         | 21224,603       |
| 122,13     | 459,2                 | 418,486                                                      | 1657,748         | 9574,431        |
| 152,13     | 610,3                 | 554,718                                                      | 3090,871         | 353,948         |
| 180,63     | 674,6                 | 629,152                                                      | 2066,027         | 9594,287        |
| 202,13     | 689,2                 | 658,101                                                      | 965,114          | 25456,075       |
| 228,13     | 689,2                 | 675,546                                                      | 185,523          | 65930,843       |
| TOTAL SUMA |                       | 336,926                                                      | 162,006          | 14106,478       |
| $X_o$      | 19,1 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 689,2 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,033 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado.         |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9809                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 36. Datos curva M4 BBM Absorbancia 680 nm.

**MUESTRA 5 (BBM)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 19,6                  | 19,601                                                                     | 0,000                               | 15712,477                          |
| 11,13          | 22,6                  | 25,175                                                                     | 6,509                               | 15293,260                          |
| 24,00          | 31,7                  | 33,445                                                                     | 3,079                               | 15159,700                          |
| 32,83          | 50,4                  | 40,475                                                                     | 97,973                              | 15451,232                          |
| 48,63          | 60,3                  | 56,342                                                                     | 15,384                              | 13762,799                          |
| 56,63          | 68,5                  | 66,194                                                                     | 5,350                               | 13569,316                          |
| 72,63          | 77,0                  | 89,930                                                                     | 166,578                             | 10497,625                          |
| 78,96          | 84,2                  | 100,839                                                                    | 277,948                             | 10173,444                          |
| 83,38          | 97,6                  | 108,955                                                                    | 128,241                             | 10574,937                          |
| 96,05          | 115,8                 | 134,317                                                                    | 344,226                             | 7902,873                           |
| 102,63         | 127,3                 | 148,556                                                                    | 451,699                             | 7356,662                           |
| 109,13         | 141,3                 | 163,179                                                                    | 478,024                             | 6955,758                           |
| 122,13         | 218,2                 | 193,461                                                                    | 614,286                             | 4491,672                           |
| 152,13         | 278,7                 | 261,799                                                                    | 285,335                             | 146,071                            |
| 180,63         | 318,0                 | 314,215                                                                    | 14,172                              | 1391,966                           |
| 202,13         | 332,8                 | 342,496                                                                    | 93,701                              | 6088,121                           |
| 228,13         | 395,7                 | 365,182                                                                    | 933,446                             | 19523,102                          |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 85,731                              | 3915,951                           |
| X <sub>o</sub> | 19,6 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 395,7 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,024 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9775                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 37. Datos curva M5 BBM Absorbancia 680 nm.

## ANEXO XII. DATOS CURVAS AGUA RESIDUAL ABORBANCIA 550 NM

### MUESTRA 1 (AR)

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 48,6                  | 48,600                                                       | 0,000            | 113923,382      |
| 24,00      | 282,9                 | 256,516                                                      | 696,128          | 260441,804      |
| 49,50      | 404,1                 | 431,988                                                      | 777,733          | 158925,628      |
| 56,00      | 404,7                 | 444,636                                                      | 1594,899         | 196211,022      |
| 74,00      | 415,5                 | 456,997                                                      | 1722,004         | 254442,028      |
| 82,50      | 439,5                 | 458,471                                                      | 359,912          | 364613,857      |
| 89,50      | 443,1                 | 459,034                                                      | 253,882          | 568860,609      |
| 95,50      | 445,5                 | 459,287                                                      | 190,069          | 1010799,174     |
| 191,50     | 459,6                 | 459,600                                                      | 0,000            | 2273352,949     |
| TOTAL SUMA |                       | 400,433                                                      | 3475,128         | 5594,627        |
| $X_o$      | 48,6 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 459,6 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,099 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado .        |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9989                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 38. Datos curva M1 AR Absorbancia 550 nm.

### MUESTRA 2 (AR)

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 50,4                  | 50,400                                                       | 0,000            | 97621,957       |
| 24,00      | 273,3                 | 211,478                                                      | 3821,998         | 258686,735      |
| 49,50      | 342,6                 | 390,342                                                      | 2279,271         | 154704,644      |
| 56,00      | 394,5                 | 410,692                                                      | 262,186          | 184181,705      |
| 74,00      | 417,3                 | 435,655                                                      | 336,922          | 226317,156      |
| 82,50      | 425,1                 | 439,646                                                      | 211,599          | 321355,896      |
| 89,50      | 425,7                 | 441,403                                                      | 246,583          | 499632,327      |
| 95,50      | 444,0                 | 442,290                                                      | 2,923            | 886563,469      |
| 191,50     | 443,7                 | 443,699                                                      | 0,000            | 1990789,336     |
| TOTAL SUMA |                       | 336,926                                                      | 3265,606         | 7161,481        |
| $X_o$      | 50,4 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 443,7 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,084 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado.         |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9985                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 39. Datos curva M2 AR Absorbancia 550 nm.

### MUESTRA 3 (AR)

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 54,3                  | 54,300                                                       | 0,000            | 100293,554      |
| 24,00      | 230,1                 | 164,316                                                      | 4327,547         | 326765,327      |
| 49,50      | 360,9                 | 342,206                                                      | 349,478          | 216409,552      |
| 56,00      | 387,0                 | 380,521                                                      | 41,975           | 243384,124      |
| 74,00      | 416,1                 | 452,331                                                      | 1312,654         | 253767,796      |
| 82,50      | 426,6                 | 471,183                                                      | 1987,657         | 342988,103      |
| 89,50      | 446,4                 | 481,712                                                      | 1246,934         | 520614,221      |
| 95,50      | 435,3                 | 488,121                                                      | 2790,025         | 913246,446      |
| 191,50     | 504,3                 | 504,235                                                      | 0,004            | 2008865,612     |
| TOTAL SUMA |                       | 336,926                                                      | 3338,924         | 12056,274       |
| $X_o$      | 54,3 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 504,3 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,058 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado.         |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9976                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 40. Datos curva M3 AR Absorbancia 550 nm.

**MUESTRA 4 (AR)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 44,1                  | 44,100                                                                     | 0,000                               | 117903,944                         |
| 24,00          | 231,6                 | 194,226                                                                    | 1396,818                            | 331565,111                         |
| 49,50          | 381,6                 | 405,613                                                                    | 576,624                             | 190451,070                         |
| 56,00          | 425,4                 | 434,862                                                                    | 89,527                              | 220432,091                         |
| 74,00          | 447,9                 | 473,457                                                                    | 653,145                             | 259241,331                         |
| 82,50          | 474,0                 | 480,080                                                                    | 36,972                              | 365257,341                         |
| 89,50          | 509,1                 | 483,079                                                                    | 677,071                             | 566192,380                         |
| 95,50          | 515,7                 | 484,627                                                                    | 965,540                             | 1003461,584                        |
| 191,50         | 487,2                 | 487,199                                                                    | 0,000                               | 2250066,376                        |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 3487,243                            | 4395,696                           |
| X <sub>o</sub> | 44,1 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 487,2 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,079 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9992                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 41. Datos curva M4 AR Absorbancia 550 nm.

**MUESTRA 5 (AR)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 44,100                | 50,400                                                                     | 0,000                               | 31196,138                          |
| 24,00          | 194,226               | 113,185                                                                    | 630,763                             | 112401,661                         |
| 49,50          | 405,613               | 201,866                                                                    | 144,824                             | 83226,951                          |
| 56,00          | 434,862               | 222,498                                                                    | 146,464                             | 95525,339                          |
| 74,00          | 473,457               | 267,217                                                                    | 676,882                             | 99770,373                          |
| 82,50          | 480,080               | 281,676                                                                    | 181,598                             | 132917,479                         |
| 89,50          | 483,079               | 290,815                                                                    | 67,488                              | 199437,163                         |
| 95,50          | 484,627               | 296,981                                                                    | 35,770                              | 347250,320                         |
| 191,50         | 487,199               | 318,581                                                                    | 0,101                               | 743593,281                         |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 2043,219                            | 1883,891                           |
| X <sub>o</sub> | 50,4 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 318,9 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,045 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9990                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 42. Datos curva M5 AR Absorbancia 550 nm.

### ANEXO XIII. DATOS CURVAS AGUA RESIDUAL ABORBANCIA 680 NM

#### MUESTRA 1 (AR)

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 51,7                  | 51,654                                                       | 0,000            | 103856,174      |
| 24,00      | 229,0                 | 208,975                                                      | 399,189          | 284225,070      |
| 49,50      | 398,8                 | 396,796                                                      | 4,196            | 169700,744      |
| 56,00      | 404,3                 | 420,436                                                      | 261,645          | 199949,669      |
| 74,00      | 412,2                 | 451,008                                                      | 1502,834         | 241190,192      |
| 82,50      | 451,3                 | 456,213                                                      | 24,199           | 341206,306      |
| 89,50      | 470,4                 | 458,573                                                      | 139,694          | 529694,295      |
| 95,50      | 438,2                 | 459,794                                                      | 467,083          | 939311,159      |
| 191,50     | 461,8                 | 461,840                                                      | 0,000            | 2107505,642     |
| TOTAL SUMA |                       | 400,433                                                      | 3365,290         | 2798,840        |
| $X_o$      | 51,7 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 461,8 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,078 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado.         |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9994                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 43. Datos curva M1 AR Absorbancia 680 nm.

#### MUESTRA 2 (AR)

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 52,2                  | 52,224                                                       | 0,000            | 84779,622       |
| 24,00      | 218,1                 | 187,771                                                      | 921,221          | 243258,682      |
| 49,50      | 346,1                 | 355,935                                                      | 96,520           | 149537,414      |
| 56,00      | 369,8                 | 380,120                                                      | 107,137          | 174521,923      |
| 74,00      | 388,9                 | 414,433                                                      | 653,559          | 205274,365      |
| 82,50      | 404,5                 | 420,995                                                      | 270,593          | 288502,093      |
| 89,50      | 440,2                 | 424,148                                                      | 256,926          | 446561,076      |
| 95,50      | 429,6                 | 425,856                                                      | 14,242           | 790845,211      |
| 191,50     | 429,1                 | 429,057                                                      | 0,000            | 1770873,445     |
| TOTAL SUMA |                       | 336,926                                                      | 3090,540         | 2320,198        |
| $X_o$      | 52,2 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 429,1 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,072 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado.         |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9994                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 44. Datos curva M2 AR Absorbancia 680 nm.

#### MUESTRA 3 (AR)

| t(horas)   | X (mg/L)              | $X_{pred}$ (mg/L)                                            | $(X-X_{pred})^2$ | $(X-X_{med})^2$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| 0,00       | 56,8                  | 56,785                                                       | 0,000            | 93172,146       |
| 24,00      | 177,9                 | 177,658                                                      | 0,074            | 291690,904      |
| 49,50      | 376,0                 | 351,912                                                      | 582,195          | 187784,271      |
| 56,00      | 382,6                 | 384,417                                                      | 3,311            | 214130,302      |
| 74,00      | 421,1                 | 439,517                                                      | 339,984          | 234997,178      |
| 82,50      | 426,8                 | 452,492                                                      | 661,131          | 323468,915      |
| 89,50      | 450,7                 | 459,383                                                      | 74,977           | 495670,111      |
| 95,50      | 443,0                 | 463,421                                                      | 415,912          | 873625,349      |
| 191,50     | 472,7                 | 472,648                                                      | 0,001            | 1939871,141     |
| TOTAL SUMA |                       | 336,926                                                      | 3258,233         | 2077,586        |
| $X_o$      | 56,8 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>          |                  |                 |
| $X_m$      | 472,7 mg/L            | $X_{pred}$ : concentración biomasa que predice el modelo.    |                  |                 |
| $\mu$      | 0,062 h <sup>-1</sup> | $(X-X_{pred})^2$ : Suma de los residuos al cuadrado.         |                  |                 |
| $R_2$      | 0,9996                | $X_{med}$ : es la media de todos los valores de $X_{pred}$ . |                  |                 |

Tabla 45. Datos curva M3 AR Absorbancia 680 nm.

**MUESTRA 4 (AR)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 46,5                  | 46,523                                                                     | 0,000                               | 107247,075                         |
| 24,00          | 171,1                 | 185,338                                                                    | 203,004                             | 310818,444                         |
| 49,50          | 372,9                 | 383,720                                                                    | 116,954                             | 183884,720                         |
| 56,00          | 416,5                 | 413,982                                                                    | 6,429                               | 211429,798                         |
| 74,00          | 469,0                 | 456,962                                                                    | 144,115                             | 243513,423                         |
| 82,50          | 481,2                 | 465,055                                                                    | 261,440                             | 341140,218                         |
| 89,50          | 500,3                 | 468,891                                                                    | 987,934                             | 527445,028                         |
| 95,50          | 513,7                 | 470,944                                                                    | 1829,745                            | 933707,770                         |
| 191,50         | 474,7                 | 474,665                                                                    | 0,000                               | 2090070,958                        |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 3366,080                            | 3549,620                           |
| X <sub>o</sub> | 46,5 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 474,7 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,074 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9993                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 46. Datos curva M4 AR Absorbancia 680 nm.

**MUESTRA 5 (AR)**

| t(horas)       | X (mg/L)              | X <sub>pred</sub> (mg/L)                                                   | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> | (X-X <sub>med</sub> ) <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0,00           | 57,4                  | 57,355                                                                     | 0,000                               | 26259,676                          |
| 24,00          | 83,3                  | 109,525                                                                    | 688,051                             | 104269,942                         |
| 49,50          | 202,7                 | 183,274                                                                    | 378,535                             | 83823,509                          |
| 56,00          | 211,3                 | 202,318                                                                    | 80,342                              | 97243,676                          |
| 74,00          | 234,7                 | 249,442                                                                    | 218,630                             | 100291,780                         |
| 82,50          | 258,6                 | 267,574                                                                    | 80,530                              | 130967,720                         |
| 89,50          | 286,5                 | 280,296                                                                    | 38,924                              | 193288,769                         |
| 95,50          | 287,1                 | 289,658                                                                    | 6,519                               | 332735,922                         |
| 191,50         | 337,0                 | 335,186                                                                    | 3,252                               | 671943,654                         |
| TOTAL SUMA     |                       | 336,926                                                                    | 1974,629                            | 1494,783                           |
| X <sub>o</sub> | 57,4 mg/L             | <b>ECUACIÓN FÓRMULA MODELO CRECIMIENTO (SOLVER)</b>                        |                                     |                                    |
| X <sub>m</sub> | 337,0 mg/L            | X <sub>pred</sub> : concentración biomasa que predice el modelo.           |                                     |                                    |
| μ              | 0,036 h <sup>-1</sup> | (X-X <sub>pred</sub> ) <sup>2</sup> : Suma de los residuos al cuadrado.    |                                     |                                    |
| R <sub>2</sub> | 0,9991                | X <sub>med</sub> : es la media de todos los valores de X <sub>pred</sub> . |                                     |                                    |

Tabla 47. Datos curva M5 AR Absorbancia 680 nm.

**ANEXO XIV. DATOS DE TASA DE CRECIMIENTO Y TIEMPO DE DUPLICACIÓN CELULAR DE LAS MUESTRAS DE BBM Y AR**

| <b>BBM - ABSORBANCIA 550 nm</b> |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MUESTRAS                        | M1    | M2    | M3    | M4    | M5    |
| $\mu$                           | 0,055 | 0,048 | 0,037 | 0,030 | 0,022 |
| Td (horas)                      | 12,54 | 14,51 | 18,76 | 22,73 | 31,51 |
| Td (horas)                      | 0,523 | 0,605 | 0,781 | 0,947 | 1,313 |

| <b>BBM - ABSORBANCIA 680 nm</b> |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MUESTRAS                        | M1    | M2    | M3    | M4    | M5    |
| $\mu$                           | 0,064 | 0,052 | 0,039 | 0,033 | 0,024 |
| Td (horas)                      | 10,88 | 13,27 | 17,90 | 21,18 | 29,09 |
| Td (horas)                      | 0,453 | 0,553 | 0,746 | 0,883 | 1,212 |

| <b>AR - ABSORBANCIA 550 nm</b> |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MUESTRAS                       | M1    | M2    | M3    | M4    | M5    |
| $\mu$                          | 0,099 | 0,084 | 0,058 | 0,079 | 0,045 |
| Td (horas)                     | 7,02  | 8,21  | 11,99 | 8,77  | 15,47 |
| Td (horas)                     | 0,293 | 0,342 | 0,500 | 0,366 | 0,645 |

| <b>AR - ABSORBANCIA 680 nm</b> |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MUESTRAS                       | M1    | M2    | M3    | M4    | M5    |
| $\mu$                          | 0,078 | 0,072 | 0,062 | 0,074 | 0,036 |
| Td (horas)                     | 8,84  | 9,64  | 11,21 | 9,38  | 19,49 |
| Td (horas)                     | 0,368 | 0,402 | 0,467 | 0,391 | 0,812 |

**ANEXO XV. MÉTODOS ANÁLISIS PARAMETROS FISICOQUÍMICOS EN EDAR**

En el anexo I del Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, es donde se desarrollan los requisitos de los vertidos de las aguas residuales. Los parámetros y los métodos de medida de referencia del anexo son los siguientes:

- Demanda química de oxígeno (DQO).  
Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Dicromato potásico.
- Sólidos totales en suspensión (SST).  
Filtración de una muestra representativa a través de filtración de 0,45 micras. Secado a 105° C y pesaje.
- Nitrógeno Total (Nt).  
Espectrofotometría de Absorción molecular.
- Fósforo Total (Pt).  
Espectrofotometría de Absorción molecular.

Por otro lado, la Orden MAM/3207/2006, de 25 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción técnica complementaria MMA-EECC-1/06, determinaciones químicas y microbiológicas para el análisis de las aguas.

| <b>Ensayo</b> | <b>Descripción del Ensayo</b>                                                                                                                                                                                                | <b>Expresión</b>     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>DQO</b>    | UNE 77-004-89: Cantidad de oxígeno que es equivalente a la cantidad de dicromato consumido por las materias disueltas y en suspensión, cuando la muestra de agua es tratada por dicho oxidante, en las condiciones definidas | mg O <sub>2</sub> /L |
| <b>SST</b>    | UNE-EN 872:1996:2002. Sólidos separados por filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de borosilicato sin aglomerante, redondo y con un diámetro fijo.                                                             | mg/L                 |
| <b>Nt</b>     | Suma del nitrógeno Kjeldahl, nitratos y nitritos.                                                                                                                                                                            | mg N/L               |
| <b>Pt</b>     | Concentración total de fósforo procedente de la materia orgánica e inorgánica presente en la muestra.                                                                                                                        | mg P/L               |

Tabla 48. Métodos análisis parámetros fisicoquímicos en EDAR.

**ANEXO XVI. DATOS DETERMINACIÓN POTENCIAL DE OXIGENACIÓN A DIFERENTES INTENSIDADES DE LUZ**

| Potencia LED | Ensayos O2 | Distancia (cm) | Intensidad LED | y'     |
|--------------|------------|----------------|----------------|--------|
| 0            | 0          | 75             | 54             | 0,0008 |
| 1            | 1          | 80             | 132            | 0,0074 |
| 1            | 2          | 55             | 224            | 0,0132 |
| 1            | 3          | 35             | 380            | 0,0128 |
| 1            | 4          | 25             | 515            | 0,0115 |
| 1            | 5          | 20             | 643            | 0,0110 |
| 1            | 6          | 15             | 924            | 0,0110 |
| 1            | 7          | 10             | 1675           | 0,0095 |
| 2            | 10         | 10             | 3739           | 0,0072 |
| 2            | 9          | 5              | 5875           | 0,0016 |

Tabla 49. Datos del potencial de oxigenación a diferentes intensidades de luz.

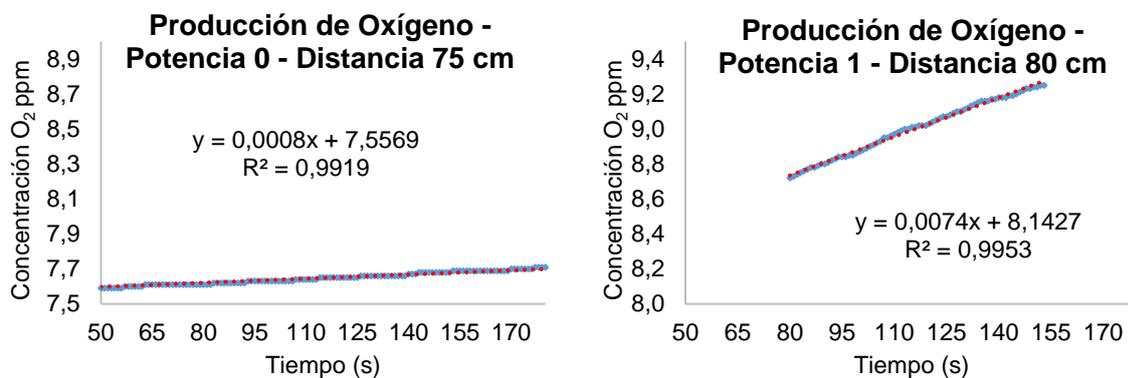


Figura 52. Gráficas producción de oxígeno Potencia 0-1 Distancias 75-80 cm.

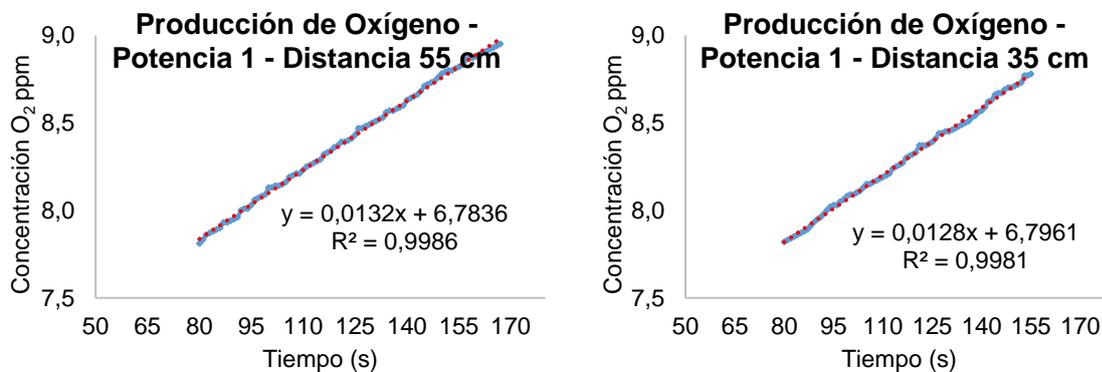


Figura 53. Gráficas producción de oxígeno Potencia 1-1 Distancias 55-35 cm.

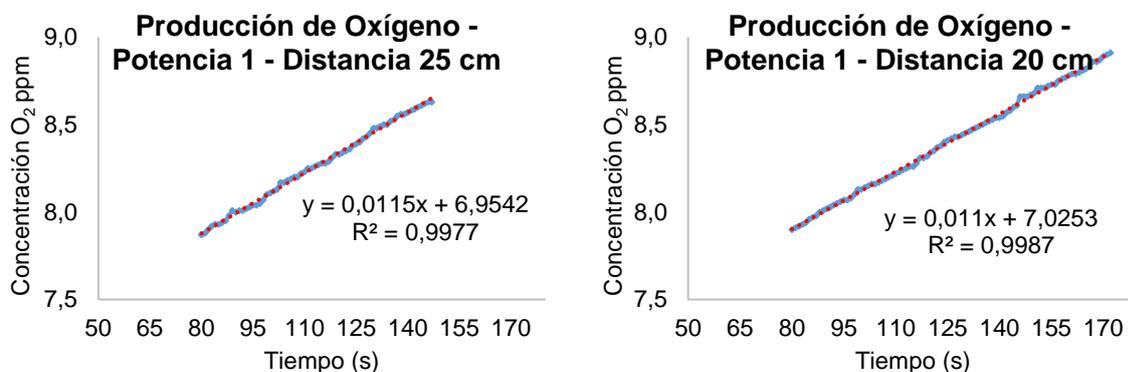


Figura 54. Gráficas producción de oxígeno Potencia 1-1 Distancias 25-20 cm.

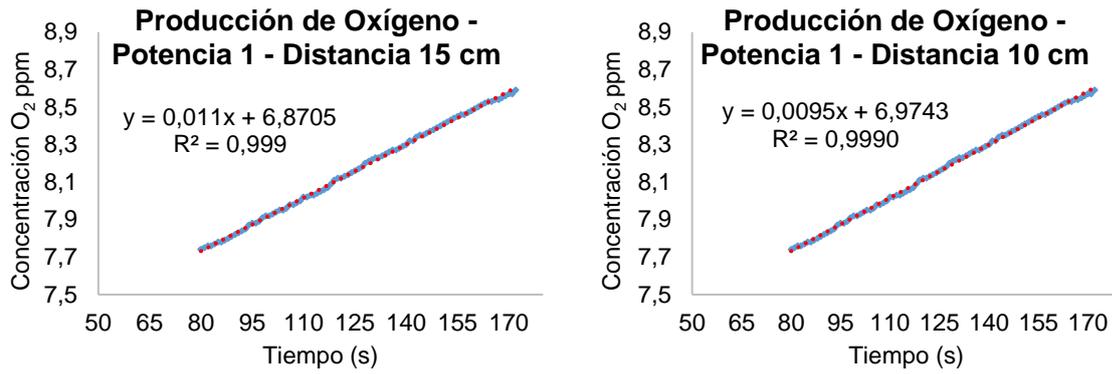


Figura 55. Gráficas producción de oxígeno Potencia 1-1 Distancias 15-10 cm.

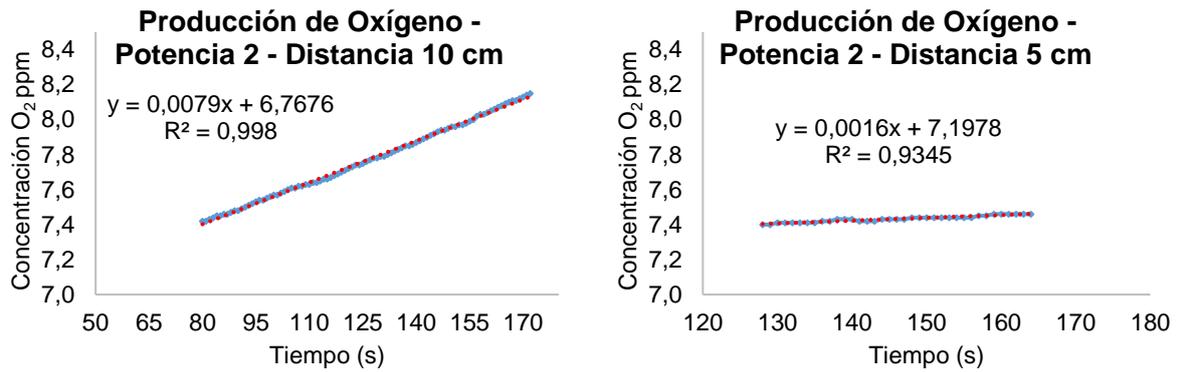


Figura 56. Gráficas producción de oxígeno Potencia 2-2 Distancias 10-5 cm.

### ANEXO XVII. DATOS DETERMINACIÓN POTENCIAL DE OXIGENACIÓN A DIFERENTES pH

|                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>pH ácidos</b>      | 1,14   | 2,43   | 3,76   | 4,25   | 4,73   | 5,17   | 5,76   | 6,42   | 6,46   | 6,89   |
| <b>P. Oxigenación</b> | 0,0036 | 0,0061 | 0,0093 | 0,0115 | 0,013  | 0,0162 | 0,0167 | 0,0156 | 0,0165 | 0,0151 |
| <b>pH básicos</b>     | 7,30   | 8,09   | 8,40   | 9,14   | 9,65   | 9,74   | 10,85  | 11,66  | 11,91  | 12,04  |
| <b>P. Oxigenación</b> | 0,0144 | 0,0122 | 0,0118 | 0,0129 | 0,0118 | 0,0139 | 0,0122 | 0,0105 | 0,0089 | 0,0000 |

Tabla 50. Datos de pH y potencial de oxigenación.

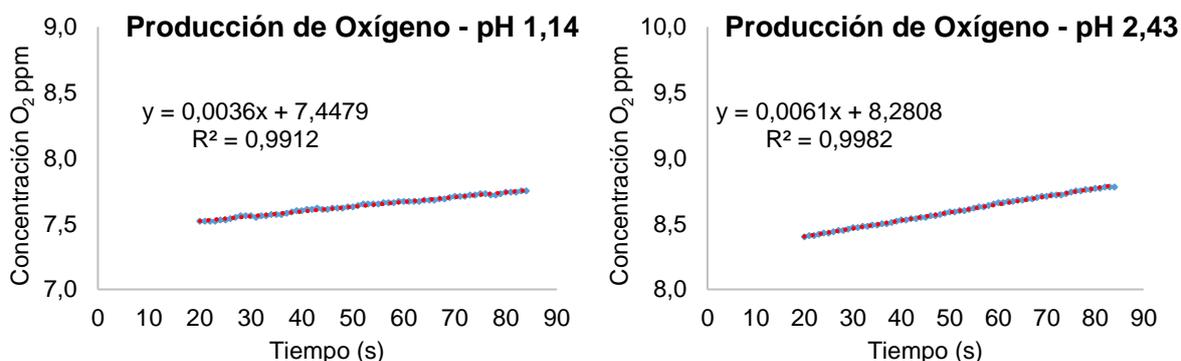


Figura 57. Gráficas producción de oxígeno pH 1,14 y 2,43.

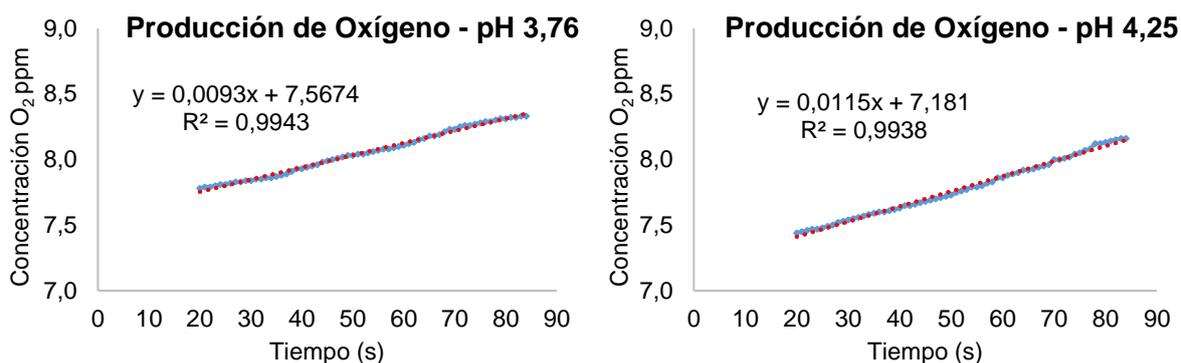


Figura 58. Gráficas producción de oxígeno pH 3,76 y 4,25.

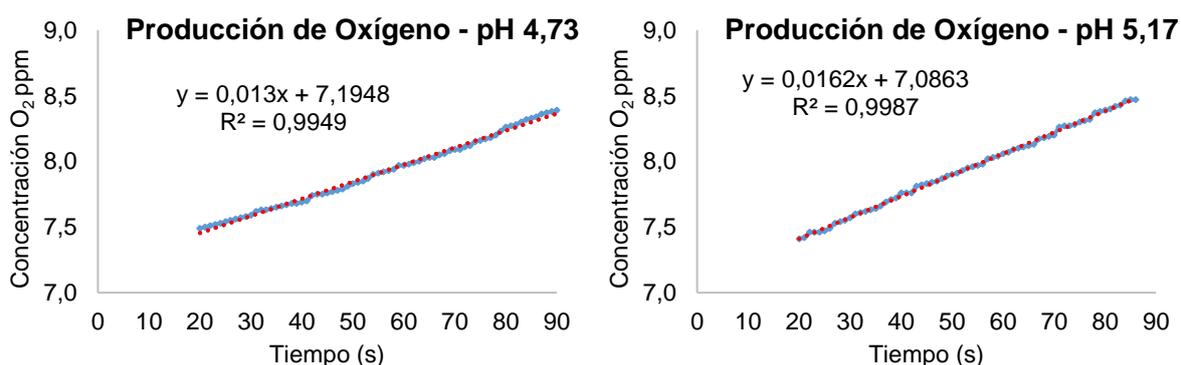


Figura 59. Gráficas producción de oxígeno pH 4,73 y 5,17.

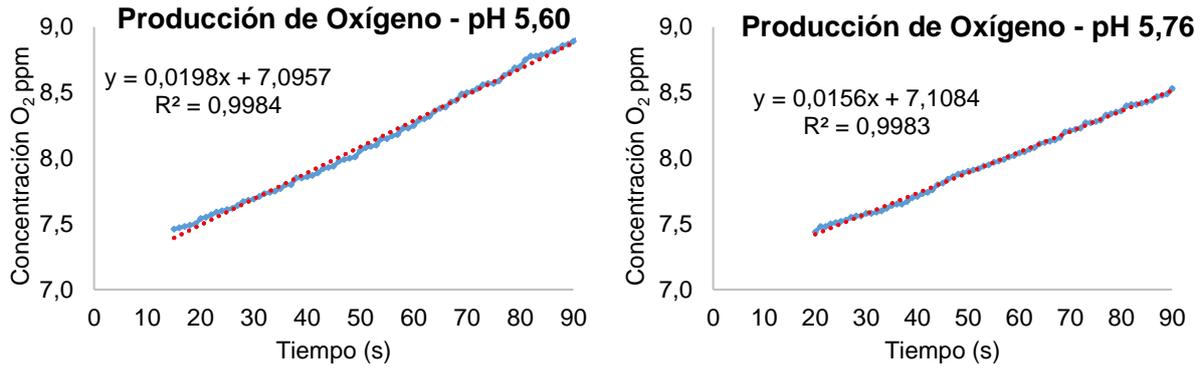


Figura 60. Gráficas producción de oxígeno pH 5,60 y 5,76.

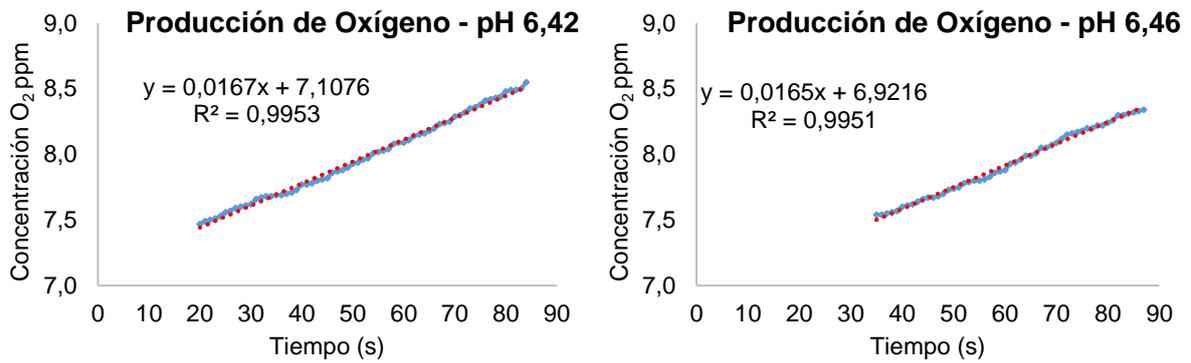


Figura 61. Gráficas producción de oxígeno pH 6,42 y 6,46.

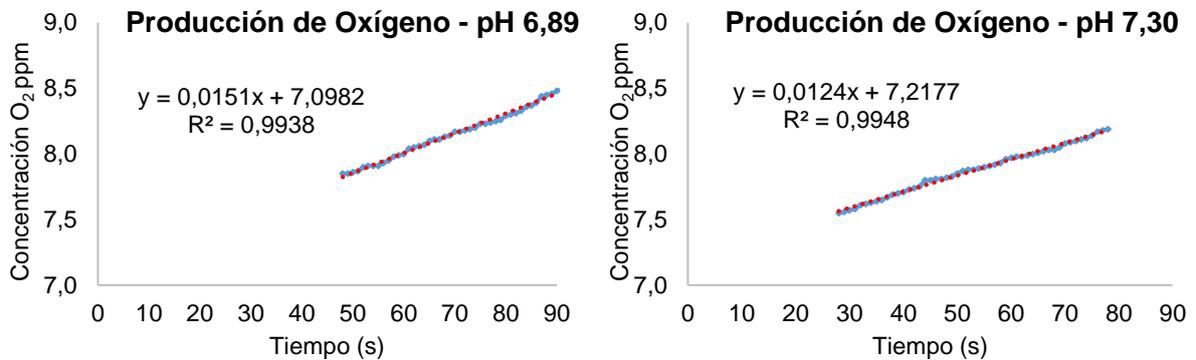


Figura 62. Gráficas producción de oxígeno pH 6,89 y 7,30.

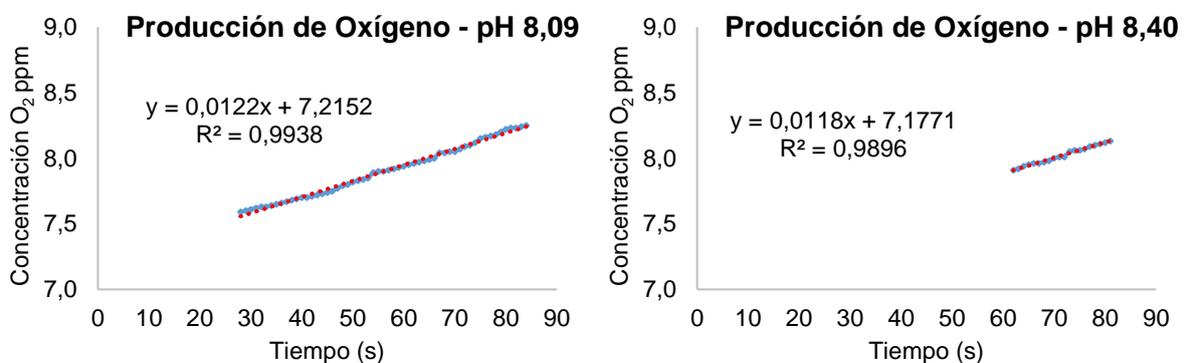


Figura 63. Gráficas producción de oxígeno pH 8,09 y 8,40.

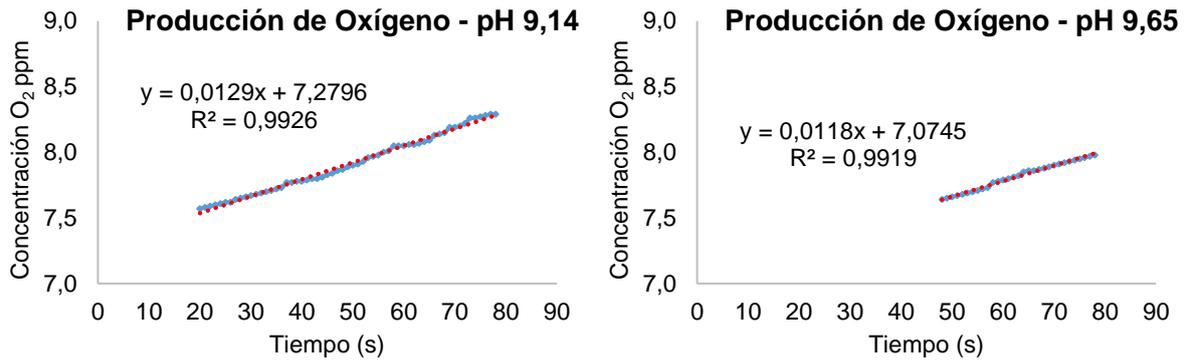


Figura 64. Gráficas producción de oxígeno pH 9,14 y 9,65.

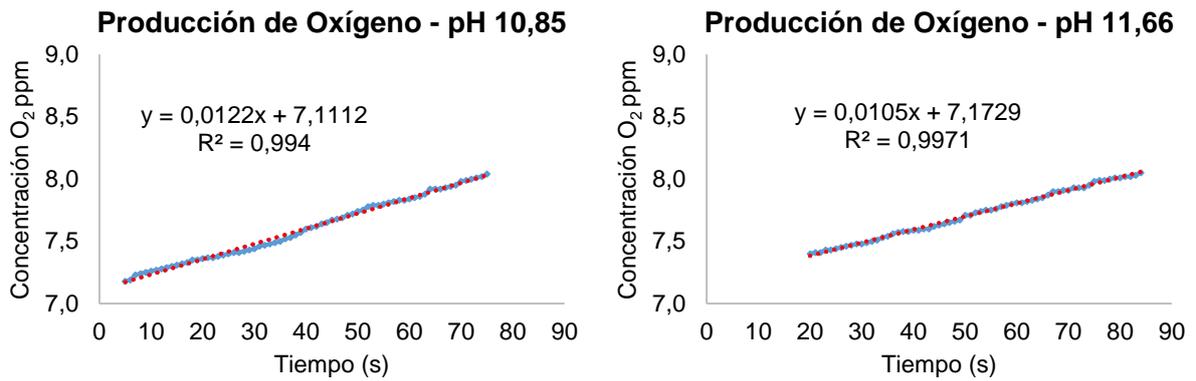


Figura 65. Gráficas producción de oxígeno pH 10,85 y 11,66.

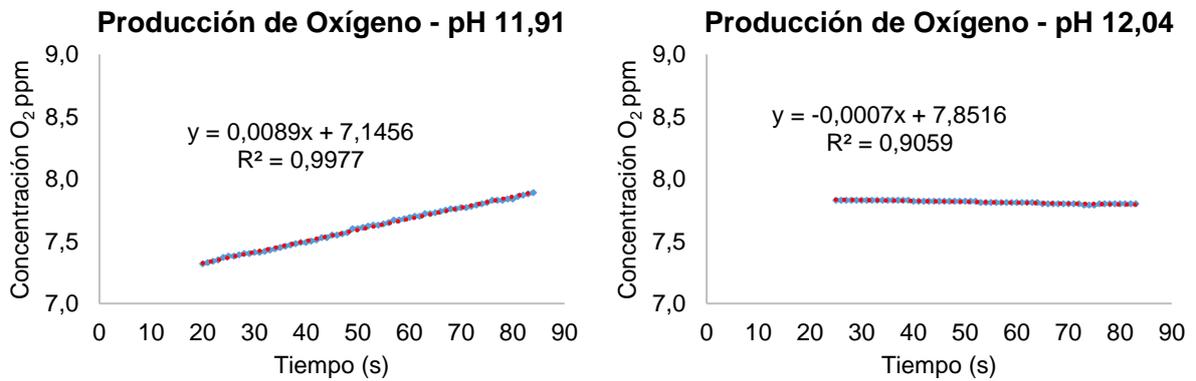


Figura 66. Gráficas producción de oxígeno pH 11,91 y 12,04.

**ANEXO XVIII. CURVA DILUCIÓN CONCENTRACIÓN N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>**

| ppm           | agua dst. (ml) | K-Na (ml) | Nessler (ml)                            | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ml) | ABS                                 |
|---------------|----------------|-----------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 0             | 10,00          | 0,20      | 0,20                                    | 0,00                                | 0,000                               |
| 0,5           | 9,50           | 0,20      | 0,20                                    | 0,50                                | 0,152                               |
| 1             | 9,00           | 0,20      | 0,20                                    | 1,00                                | 0,386                               |
| 2             | 8,00           | 0,20      | 0,20                                    | 2,00                                | 0,626                               |
| 3             | 7,00           | 0,20      | 0,20                                    | 3,00                                | 1,070                               |
| 5             | 5,00           | 0,20      | 0,20                                    | 5,00                                | 1,397                               |
| 7             | 3,00           | 0,20      | 0,20                                    | 7,00                                | 1,678                               |
| 10            | 0,00           | 0,20      | 0,20                                    | 10,00                               | 2,105                               |
| muestra       | ABS 470 nm     |           | 1:4 N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/L |                                     | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/L |
| Agua residual | 0,747          |           | 2,0926993                               |                                     | 10,4634965                          |

Tabla 51. Datos de la curva dilución concentración N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

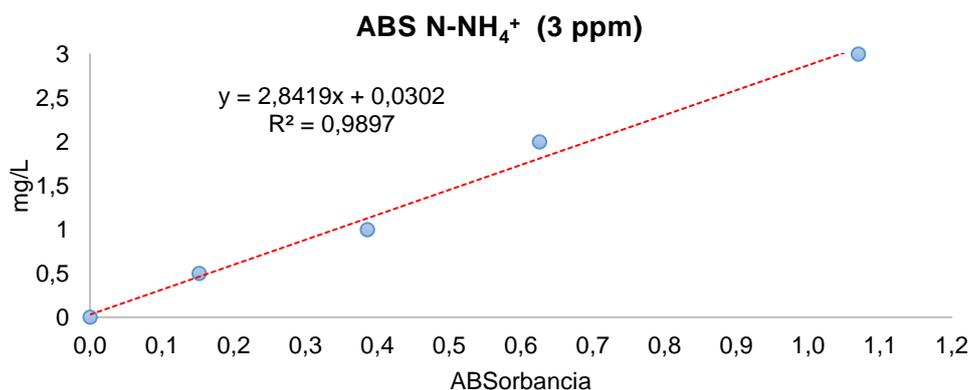


Figura 67. Gráfica curva dilución N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

| muestra | FECHA      | ABS 470 nm | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/L | Dilución | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/L |
|---------|------------|------------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| ENTRADA | 09/05/2018 | 0,586      | 1,6955534                           | 1/4      | 6,7822136                           |
| SALIDA  | 09/05/2018 | 0,024      | 0,0984056                           | 1/2      | 0,1968112                           |
| ENTRADA | 11/05/2018 | 0,601      | 1,7381819                           | 1/4      | 6,9527276                           |
| SALIDA  | 11/05/2018 | 0,020      | 0,087038                            | 1/2      | 0,174076                            |
| ENTRADA | 14/05/2018 | 0,671      | 1,9371149                           | 1/4      | 7,7484596                           |
| SALIDA  | 14/05/2018 | 0,023      | 0,0955637                           | 1/2      | 0,1911274                           |
| ENTRADA | 16/05/2018 | 1,036      | 2,9744084                           | 1/4      | 11,8976336                          |
| SALIDA  | 16/05/2018 | 0,129      | 0,3968051                           | 1/2      | 0,7936102                           |
| ENTRADA | 18/05/2018 | 1,008      | 2,8948352                           | 1/4      | 11,5793408                          |
| SALIDA  | 18/05/2018 | 0,116      | 0,3598604                           | 1/2      | 0,7197208                           |
| ENTRADA | 21/05/2018 | 0,950      | 2,730005                            | 1/4      | 10,92002                            |
| SALIDA  | 21/05/2018 | 0,025      | 0,1012475                           | 1/2      | 0,202495                            |
| ENTRADA | 23/05/2018 | 1,050      | 3,014195                            | 1/4      | 12,05678                            |
| SALIDA  | 23/05/2018 | 0,010      | 0,058619                            | 1/2      | 0,117238                            |
| ENTRADA | 25/05/2018 | 1,020      | 2,928938                            | 1/4      | 11,715752                           |
| SALIDA  | 25/05/2018 | 0,012      | 0,0643028                           | 1/2      | 0,1286056                           |
| ENTRADA | 28/05/2018 | 1,025      | 2,9431475                           | 1/4      | 11,77259                            |
| SALIDA  | 28/05/2018 | 0,011      | 0,0614609                           | 1/2      | 0,1229218                           |
| ENTRADA | 30/05/2018 | 1,005      | 2,8863095                           | 1/4      | 11,545238                           |
| SALIDA  | 30/05/2018 | 0,010      | 0,058619                            | 1/2      | 0,117238                            |

Tabla 52. Datos de análisis de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> PBR.

**ANEXO XIX. CURVA DILUCIÓN CONCENTRACIÓ P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>**

| ppm | agua dst. (ml) | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (ml) | Nessler (ml) | ABS   |
|-----|----------------|--------------------------------------|--------------|-------|
| 0   | 7,500          | 1,875                                | 0,000        | 0,000 |
| 1   | 7,125          | 1,875                                | 0,375        | 0,017 |
| 5   | 5,625          | 1,875                                | 1,875        | 0,091 |
| 10  | 3,750          | 1,875                                | 3,750        | 0,190 |
| 15  | 1,875          | 1,875                                | 5,625        | 0,291 |
| 20  | 0,000          | 1,875                                | 7,500        | 0,464 |

Tabla 53. Datos de la curva dilución concentración P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>.

| muestra       | ABS 470 nm | P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/L |
|---------------|------------|--------------------------------------|
| Agua residual | 0,175      | 9,1428                               |

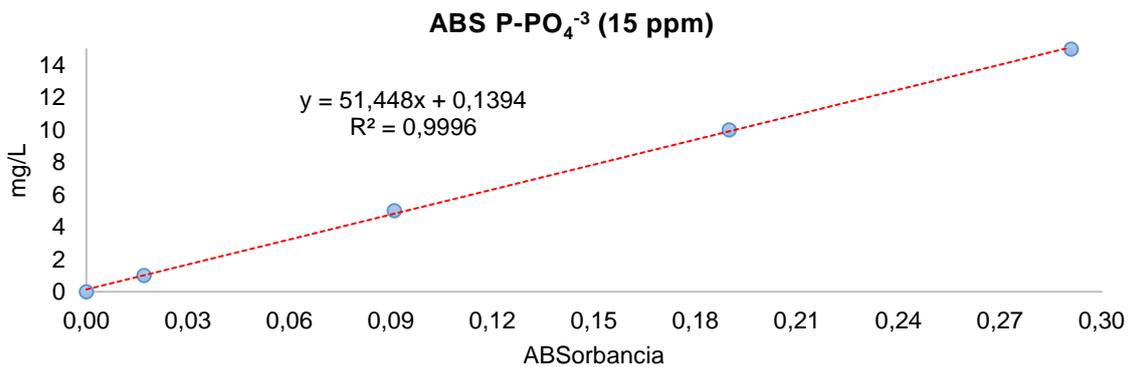


Figura 68. Gráfica curva dilución P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>.

| muestra | FECHA      | ABS 470 nm | P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/L |
|---------|------------|------------|--------------------------------------|
| ENTRADA | 09/05/2018 | 0,229      | 11,920992                            |
| SALIDA  | 09/05/2018 | 0,091      | 4,821168                             |
| ENTRADA | 11/05/2018 | 0,182      | 9,502936                             |
| SALIDA  | 11/05/2018 | 0,082      | 4,358136                             |
| ENTRADA | 14/05/2018 | 0,125      | 6,5704                               |
| SALIDA  | 14/05/2018 | 0,094      | 4,975512                             |
| ENTRADA | 16/05/2018 | 0,137      | 7,187776                             |
| SALIDA  | 16/05/2018 | 0,075      | 3,998                                |
| ENTRADA | 18/05/2018 | 0,139      | 7,290672                             |
| SALIDA  | 18/05/2018 | 0,067      | 3,586416                             |
| ENTRADA | 21/05/2018 | 0,129      | 6,776192                             |
| SALIDA  | 21/05/2018 | 0,073      | 3,895104                             |
| ENTRADA | 23/05/2018 | 0,115      | 6,05592                              |
| SALIDA  | 23/05/2018 | 0,056      | 3,020488                             |
| ENTRADA | 25/05/2018 | 0,120      | 6,31316                              |
| SALIDA  | 25/05/2018 | 0,059      | 3,174832                             |
| ENTRADA | 28/05/2018 | 0,125      | 6,5704                               |
| SALIDA  | 28/05/2018 | 0,055      | 2,96904                              |
| ENTRADA | 30/05/2018 | 0,125      | 6,5704                               |
| SALIDA  | 30/05/2018 | 0,058      | 3,123384                             |

Tabla 54. Datos análisis P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> PBR.

**ANEXO XX. CURVA DILUCCÓN CONCENTRACIÓN DQO**

| ppm | M 1   | M 2   | Media ABS 600 | M 1   | M 2   | Media ABS 600 |
|-----|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|
| 0   | 0,000 | 0,000 | 0,000         | 0,000 | 0,000 | 0,000         |
| 50  | 0,011 | 0,005 | 0,008         | 0,016 | 0,015 | 0,016         |
| 100 | 0,025 | 0,028 | 0,027         | 0,038 | 0,039 | 0,039         |
| 200 | 0,056 | 0,057 | 0,057         | 0,058 | 0,059 | 0,059         |
| 300 | 0,084 | 0,085 | 0,085         | 0,099 | 0,098 | 0,099         |
| 500 | 0,185 | 0,188 | 0,187         | 0,200 | 0,205 | 0,203         |
| 750 | 0,276 | 0,272 | 0,274         | 0,294 | 0,291 | 0,293         |

Tabla 55. Datos de la curva dilución concentración DQO.

| muestra       | ABS 600 nm | DQO mg/L |
|---------------|------------|----------|
| Agua residual | 0,150      | 393,84   |

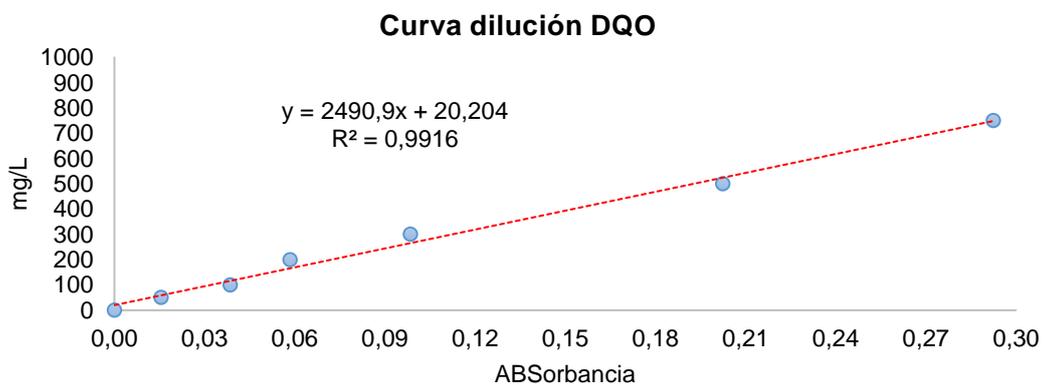


Figura 69. Gráfica curva dilución DQO.

| muestra | FECHA      | ABS 600 nm | DQO ppm  |
|---------|------------|------------|----------|
| ENTRADA | 09/05/2018 | 0,106      | 284,2394 |
| SALIDA  | 09/05/2018 | 0,020      | 70,022   |
| ENTRADA | 11/05/2018 | 0,097      | 261,8213 |
| SALIDA  | 11/05/2018 | 0,021      | 72,5129  |
| ENTRADA | 14/05/2018 | 0,111      | 296,6939 |
| SALIDA  | 14/05/2018 | 0,040      | 119,84   |
| ENTRADA | 16/05/2018 | 0,085      | 231,9305 |
| SALIDA  | 16/05/2018 | 0,020      | 70,022   |
| ENTRADA | 18/05/2018 | 0,110      | 294,203  |
| SALIDA  | 18/05/2018 | 0,022      | 75,0038  |
| ENTRADA | 21/05/2018 | 0,094      | 254,3486 |
| SALIDA  | 21/05/2018 | 0,013      | 52,5857  |
| ENTRADA | 23/05/2018 | 0,082      | 224,4578 |
| SALIDA  | 23/05/2018 | 0,017      | 62,5493  |
| ENTRADA | 25/05/2018 | 0,095      | 256,8395 |
| SALIDA  | 25/05/2018 | 0,020      | 70,022   |
| ENTRADA | 28/05/2018 | 0,096      | 259,3304 |
| SALIDA  | 28/05/2018 | 0,018      | 65,0402  |
| ENTRADA | 30/05/2018 | 0,110      | 294,203  |
| SALIDA  | 30/05/2018 | 0,016      | 60,0584  |

Tabla 56. Datos análisis DQO PBR.