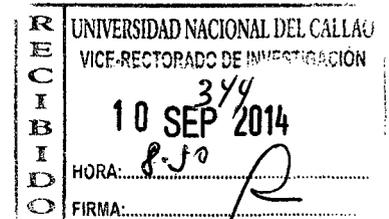


87

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**



SEP 2014



**INFORME FINAL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TOXICIDAD DEL CLORO SOBRE LA ACTIVIDAD**

**BIOLÓGICA DE FANGO ACTIVADO DETERMINADO POR**

**TÉCNICA RESPIROMÉTRICA**

**Autor:**

**RUBÉN GILBERTO RODRÍGUEZ FLORES**

**Periodo de ejecución: 01 de junio del 2013 al 31 de mayo del 2014**

**Resolución Rectoral N° 621-2013-R (Callao, 04 de Julio del 2013)**

**Bellavista – Callao. 2014**

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| INDICE   | 1  |
| RESUMEN  | 4  |
| ABSTRACT   | 5  |
| I. INTRODUCCION  | 6  |
| 1.1 Planteamiento del problema de investigación            | 6  |
| 1.2 Objetivos y alcance de la investigación                | 7  |
| 1.3 Importancia y justificación de la investigación        | 8  |
| II. MARCO TEORICO  | 10 |
| 2.1 Sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales | 10 |
| 2.2 Procesos de lodos activados                            | 11 |
| 2.3 Bulking filamentoso                                    | 15 |
| 2.4 Control de bulking filamentoso                         | 17 |
| 2.5 Técnica respirometrica                                 | 18 |
| 2.6 Bioquímica de la respirometria                         | 20 |
| 2.7 Respirometros  | 20 |
| 2.8 Actividad de los microorganismos                       | 23 |
| 2.9 Tipos de respirometros                                 | 27 |
| III. MATERIALES Y METODO                                   | 30 |
| 3.1 Materiales y equipo                                    | 30 |
| 3.2 Metodología para la prueba respirometrica              | 34 |
| 3.2.1 Preparación de las muestras para los ensayos         | 34 |
| 3.2.2 Ensayo de respirometria                              | 34 |
| IV. RESULTADOS   | 37 |
| 4.1 tasa de respiración endógena                           | 38 |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2 Nivel de toxicidad del cloro  | 40        |
| 4.2.1 Comportamiento del OD a 20°C  | 40        |
| 4.2.2 Influencia de la temperatura en la toxicidad del cloro  | 49        |
| 4.3 Evaluación estadística de los resultados  | 50        |
| <b>V. DISCUSION</b>   | <b>52</b> |
| 5.1 Conclusiones  | 54        |
| 5.2 Recomendaciones   | 56        |
| <b>VI. REFERENCIALES</b>  | <b>57</b> |
| <br>  |           |
| <b>VII. APENDICE</b>  | <b>61</b> |
| Apéndice 1. Concentración de oxígeno disuelto en los siete (7) ensayos<br>de respirometria.                     | 62        |
| Apéndice 2. Estimación lineal (ensayo sin cloro)  | 63        |
| Apéndice 3. Estimación lineal (ensayo con 2,75 mg Cloro/l)  | 65        |
| Apéndice 4. Estimación lineal (ensayo con 5,5 mg Cloro/l)   | 67        |
| Apéndice 5. Estimación lineal (ensayo con 8,25 mg Cloro/l)  | 69        |
| Apéndice 6. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg Cloro/l)  | 71        |
| Apéndice 7. Estimación lineal (ensayo con 11 mg Cloro/l)  | 73        |
| Apéndice 8. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg Cloro/l – a 25°C)   | 75        |
| Apéndice 9. Correlaciones bivariadas de los ensayos sin y con cloro   | 77        |
| <b>VIII. ANEXO</b>  | <b>79</b> |
| Anexo 1. Correlaciones de Pearson de los ensayos desarrollados sin y<br>con dosis de cloro.                     | 80        |
| Anexo 2. Microorganismos reconocidos como Filamentosos que causan<br>el Bulking o Espumas en el Fango Activado. | 81        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Anexo 3. Causas del crecimiento de Microorganismos filamentosos en el Fango Activado.</b> | <b>82</b> |
| <b>Anexo 4. Descripción y causas de espumas en fango activado.</b>                           | <b>83</b> |
| <b>Anexo 5. Foto medidor de oxígeno disuelto portátil</b>                                    | <b>84</b> |

## RESUMEN

La cloración es uno de los primeros métodos utilizados para el control del bulking filamentoso en las plantas de tratamiento de aguas residuales con sistema de lodos activados, en su aplicación es importante evaluar la supervivencia relativa entre microorganismos formadores de flóculos y filamentosos. Entre las bacterias filamentosas esta la *Sphaerotilus natans* como una de las principales causas del bulking, y como microorganismos formadores de floculos la *Acinetobacter*.

La aplicación de pruebas de respirometría para determinar el nivel de toxicidad de una sustancia en la actividad biológica de los microorganismos presentes en los lodos de los sistemas de tratamiento biológico es cada vez más utilizada para el control de las operaciones de una planta de tratamiento de agua residual. El respirometro construido muestra una versatilidad para la evaluación del nivel de toxicidad de un lodo aerobio ante la presencia de cloro, además, ha permitido establecer la tasa de respiración endógena del lodo (OUR) en  $5,61 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}\text{h}^{-1}$ , mientras que la específica (OUR<sub>e</sub>) en  $2,8 \text{ mg O}_2/\text{g SV-h}$ .

El consumo de oxígeno por parte de microorganismos aerobios es afectado por la presencia de cloro como agente toxico. La tasa de respiración endógena se ve afectada conforme se incrementa la dosis de cloro. Esta tasa de respiración endógena disminuye cuando se tiene mayor concentración de cloro (en el licor mezcla del reactor) y se vuelve nula cuando se alcanza la concentración límite de toxicidad establecida en  $11 \text{ mgCl}_2/\text{l}$  correspondiente a  $5,5\text{mgCl}_2/\text{gSV}$ . El aumento de la temperatura en la prueba de respirometría provoca un descenso en la eficiencia de toxicidad del cloro, debida principalmente a un nivel de volatilización de la sustancia.

## ABSTRACT

Chlorination is one of the first methods used to control filamentous bulking in the treatment plants wastewater activated sludge system, its application is important to assess the relative survival between floc-forming and filamentous microorganisms. Among the filamentous bacteria *Sphaerotilus natans* is one of the major causes of bulking, and floc forming microorganisms as *Acinetobacter*.

Applying respirometry test to determine the level of toxicity of a substance on the biological activity of the microorganisms present in the sludge from biological treatment systems is increasingly used to control the operation of a wastewater treatment plant. The constructed sample respirometer versatility for evaluating a level of toxicity aerobic sludge in the presence of chlorine, also has established endogenous respiration rate of the sludge (OUR) in 5,61 mgO<sub>2</sub> l<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, while specified (OUR<sub>e</sub>) at 2,8 mg O<sub>2</sub> / g SV-h.

The consumption of oxygen by aerobic microorganisms is affected by the presence of chlorine as a toxic agent. Endogenous respiration rate is affected as the dose of chlorine increases. This endogenous respiration rate decreases when you have higher concentration of chlorine (in the reactor mixture liquor) and becomes zero when the concentration limit established in 11 toxicity mgCl<sub>2</sub> / l corresponding to 5,5 mgCl<sub>2</sub>/gSV is reached. The temperature rise in respirometry test causes decreased efficiency of chlorine toxicity, principally due to a level of volatilization of the substance.

# I. INTRODUCCION

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En el Perú, el nivel de tratamiento de aguas servidas (23 %) está también lejos de las coberturas de países vecinos como Chile (72 %). La población sin servicio de agua y saneamiento es de 6,6 y 11 millones de habitantes respectivamente, los que están asentados en áreas pobres periurbanas, rurales y en localidades medianas y pequeñas (Banco Mundial, 2006).

En muchas plantas de tratamiento de aguas residuales a cargo de las Empresas Prestadora de Servicios de Agua (EPS) a nivel del país, presentan niveles deficientes de desempeño en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, más aun si no se cuenta con la suficiente información para hacerlo de manera comparativa y técnica. Las plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente basados en sistema de lodos activados, presentan dificultades operacionales por la falta de estudios de la actividad biológica que permitan establecer mejor las operaciones a nivel de planta.

La caracterización del influente de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y las condiciones de operación de los sistemas de tratamiento no son suficientes para alcanzar adecuadas eficiencias en la operación de una PTAR, por lo que se hacen necesarios nuevas herramientas tanto para el diseño, control y protección de estaciones depuradoras de aguas residuales con tratamiento biológico con fangos activados en suspensión.

### Planteamiento del problema a investigar

¿Las técnicas respirométricas es una herramienta fundamental para evaluar la toxicidad por cloro de la actividad biológica de un lodo activado proveniente de una planta de tratamiento de agua residual?

## **1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

### Objetivo general

Determinar el nivel de toxicidad del cloro en la actividad biológica de un fango activado proveniente de una planta de tratamiento de agua residual aplicando técnicas respirométricas.

### Objetivos específicos

- Diseñar y construir un reactor a nivel de laboratorio para el desarrollo de pruebas respirométricas.
- Establecer la metodología para el desarrollo de técnicas respirométricas en ensayos de actividad de un lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual.
- Determinar el nivel de consumo de oxígeno en la fase endógena de un fango activado.
- Establecer el nivel de toxicidad específica del cloro en la actividad biológica de un lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual.

## Horizontes de la investigación

El presente trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Tecnología Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales - FIARN, considerándose tres etapas:

Etapa 1: Diseño y construcción de un reactor para las pruebas de respirometría.

Etapa 2: Desarrollo de pruebas respirométricas para lodo activado.

Etapa 3: Análisis de resultados y presentación de informe de la investigación

### **1.3 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION**

La presente investigación es importante por lo siguiente:

- Ha permitido establecer el procedimiento para determinar el nivel de toxicidad de una sustancia tóxica sobre la actividad biológica de un lodo activado aplicando las técnicas respirométricas.
- Permite tener mayor conocimiento sobre la aplicación de las técnicas respirométricas en el ámbito de la biotecnología ambiental.
- Permitirá presentar el caso en los próximos eventos internacionales programados por la International Water Association (IWA), sobre evaluaciones en fangos activados.

## **Justificación de la Investigación**

El nivel de toxicidad de una sustancia en la actividad biológica de los microorganismos presentes en los sistemas de tratamiento biológico es importante poderlo establecer con la mayor certeza y con ello optimizar la gestión ambiental en las plantas de tratamiento.

La poca experiencia en técnicas respirométricas en el país, especialmente para el control de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, hacen necesario establecer metodologías adecuadas para aprovecharlas en el control de inhibidores de la actividad biológica de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales, incluso para conocer el nivel de biodegradabilidad de sustancias tóxicas que se hacen cada vez más presentes en las aguas residuales urbanas e industriales.

## **II. MARCO TEORICO**

### **2.1 Sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales**

Los sistemas aerobios dependen sobre manera de la fisiología de organismos heterótrofos, los cuales en presencia de oxígeno usan las sustancias orgánicas presentes en el agua residual ya sea como fuente de carbono para la síntesis celular y como fuente de energía. Otros heterótrofos son capaces de usar oxígeno, nitratos y nitritos (desnitrificación) para llevar a cabo la oxidación de sustrato y síntesis celular en ausencia de oxígeno. (Rodríguez R., 1997)

La actividad biológica depende de algunos parámetros tales como: contenido adecuado de nutrientes, temperatura del proceso, pH y presencia de constituyentes tóxicos en el agua residual. (Rodríguez R., 1997)

Las principales unidades biológicas aerobias (Metcalf y Eddy., 1995) incluyen:

#### **a) Procesos de alta carga**

- **Fangos activos y sus modificaciones**
- **Filtros percoladores y**
- **Sistemas rotativos biológicos**

#### **b) Procesos de baja carga**

- **Lagunas aireadas**
- **Lagunas facultativas**
- **Estanques de oxidación**

Tabla 1. Principales procesos biológicos empleados en la depuración del agua residual

|   |                       |   |   |   |
|---|-----------------------|---|---|---|
| Procesos Aerobios                                     | Cultivo en suspensión | Fangos Activados  | Continuos                               | Flujo en pistón<br>Mezcla completa                            |
|   |                       | Lagunas aireadas  | Discontinuos                            | Aireación prolongada<br>Canales de oxidación<br>Nitrificación |
| Procesos Anóxicos                                     | Cultivo fijo          | Biodiscos rotativos   |   |   |
|   |                       | Filtros percoladores  | Alta carga<br>Baja carga                |   |
| Procesos Anaerobios                                   | Cultivo en suspensión | Digestión anaerobia   | Alta carga<br>Baja carga<br>Doble etapa |   |
|   | Cultivo fijo          | Filtro anaerobio<br>Lecho expandido   |   |   |
| Procesos combinados<br>(anaerobios-anóxicos-aerobios) |                       | Nitrificación-desnitrificación<br>Nitrificación-desnitrificación-eliminación de fósforo |   |   |

Fuente: Metcalf y Eddy, 1995.

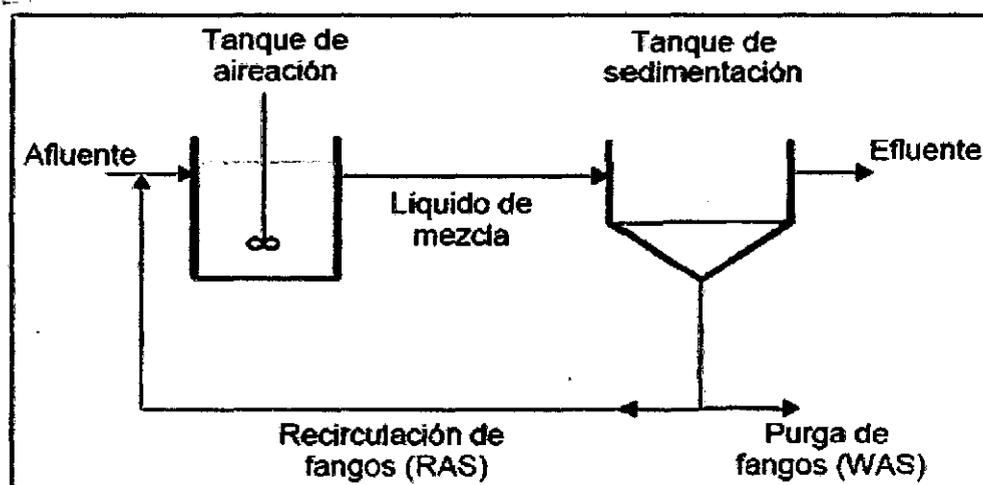
## 2.2 Procesos de Lodos Activados

El proceso de fangos activos utiliza una masa activa de microorganismos floculentos en suspensión para convertir la materia orgánica del agua residual en biomasa sedimentable, la cual puede ser separada del líquido mezcla por medio de procesos físicos (Rodríguez R., 1997)

El proceso de lodos activados es la técnica más ampliamente utilizada para el tratamiento de agua residual. Un reactor de lodos activados mantiene en suspensión a un cultivo microbiano en condiciones aerobias. El proceso hace uso de un sistema de aireación o agitación, el cual suministrará el oxígeno que demandan las bacterias, evitará que haya asentamiento de la biomasa en el reactor y, además, mantendrá homogeneidad del licor mezclado en el tanque, (Wanner, 1998), esto se puede apreciar en la figura 1.

Una vez que la materia orgánica ha sido oxidada, el efluente se envía a un sedimentador o decantador secundario en donde se separará el fango (biomasa) del agua. Parte de esta biomasa decantada es recirculada al reactor con el fin de mantener en él una buena concentración de microorganismos y otra parte se desecha (purga), llevándola a tratamiento de lodos, evitando así acumulaciones excesivas de microorganismos en el sistema que pueden alterar los tiempos de retención celular.

Figura1. Sistema de lodos activados



Fuente: Hernandez A. 1998.

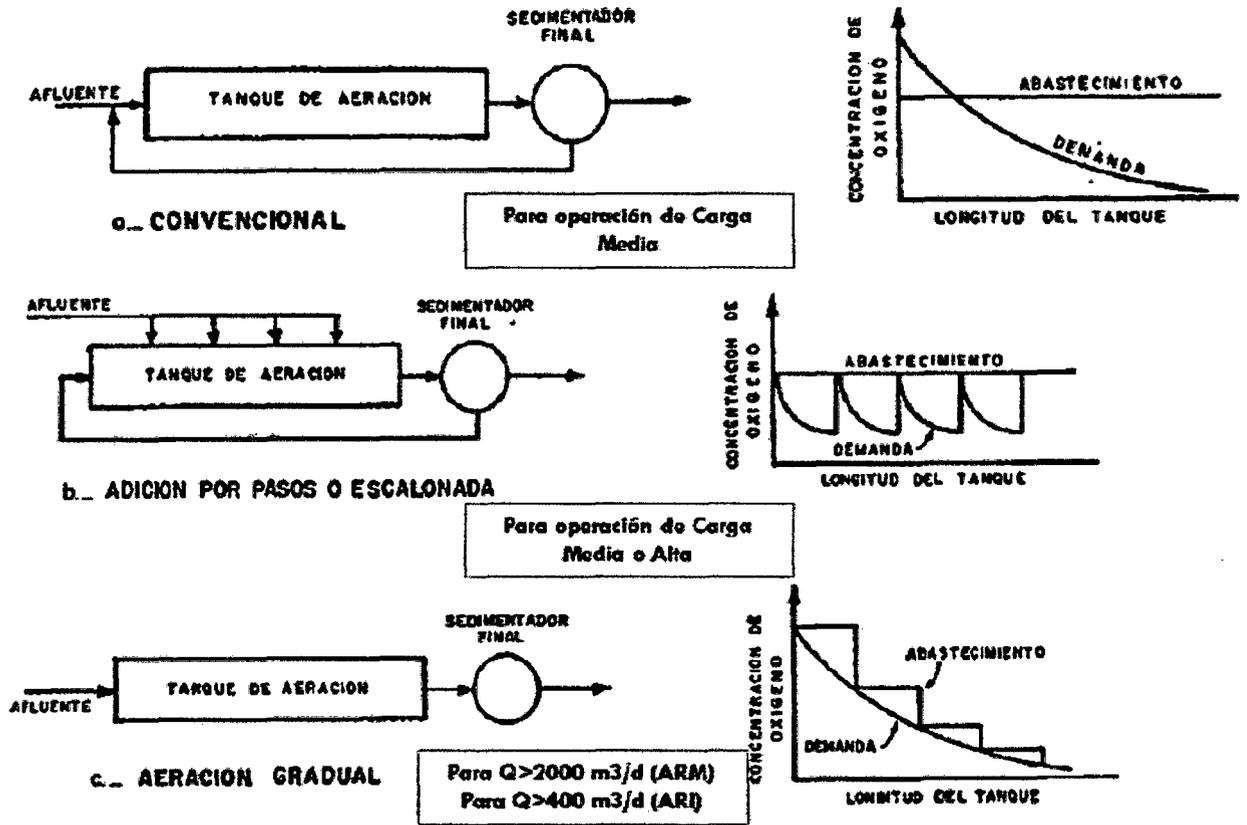
Mecanismos de aireación:

Se presentan los siguientes (Ramalho, R.S. 1996) sistemas de aireación:

- Aireación convencional: consiste en abastecer exactamente la misma cantidad de oxígeno a lo largo de todo el reactor. Se emplea en operaciones con carga media y alta.
- Adición por pasos o escalonada: en este caso, aunque se mantiene la misma alimentación de oxígeno a lo largo del reactor, el afluente de aguas residuales se ingresa al tanque en diferentes puntos a lo largo de su recorrido. Se usa en operaciones de carga media o alta.
- Aireación gradual: se prefiere en caudales mayores a los 2000 m<sup>3</sup>/d para aguas residuales municipales y mayores a 400 m<sup>3</sup>/d para depuración de aguas residuales industriales. El suministro de aire desciende de manera gradual y proporcional a la disminución de la DBO a lo largo del reactor.

Los sistemas de lodos activados son aplicados tanto para el tratamiento de aguas residuales industriales como urbanas. Estos sistemas aerobios biológicos presentan en algún momento alteraciones en su eficiencia por el desequilibrio en la población bacteriana, para corregir se hace importante evaluar el comportamiento de los microorganismos frente a la presencia de sustancia inhibidoras. El desequilibrio en la población de microorganismos afecta la sedimentación mediante el proceso conocido como Bulking filamentoso.

Figura 2. Métodos de aireación para reactores de lodos activados de flujo a pistón



Fuente: Metcalf y Eddy, 1995.

En la figura 3 se puede observar un sistema de lodos activados que trata agua residual proveniente de una papelería; de acuerdo a las características físicas, químicas y biológicas del licor mezcla del reactor biológico aerobio, indica que hay un proceso normal de crecimiento bacteriano, con equilibrio en su población, especialmente de organismos filamentosos y floculentos, que permite un índice de sedimentación aceptable.

Figura 3. Reactor de lodos activados. Planta de tratamiento de Aguas Residuales de la papelera Smurfit – España.

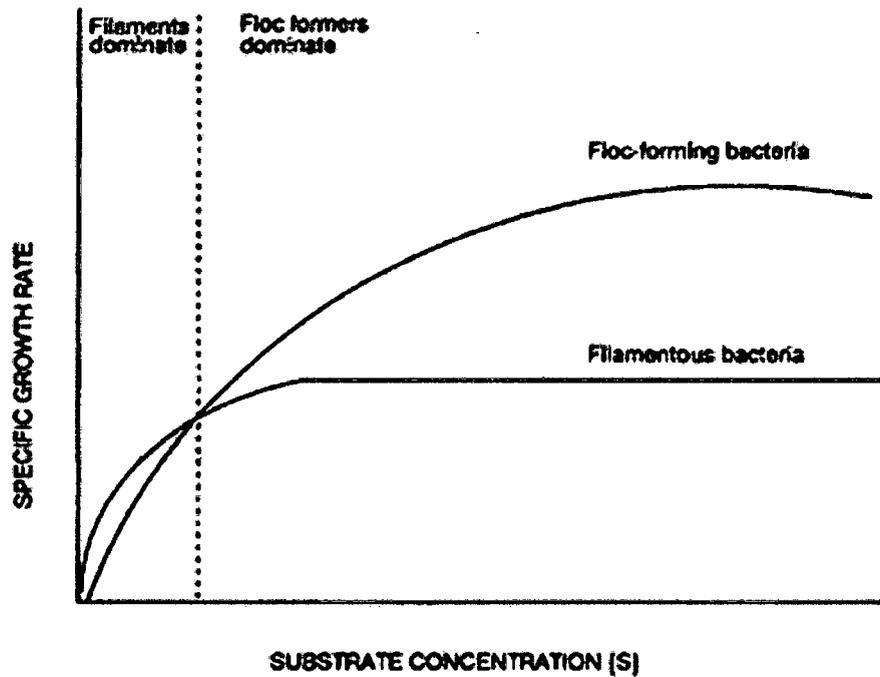


*Fuente: Rodríguez R. 1997.*

### **2.3 Bulking filamentoso**

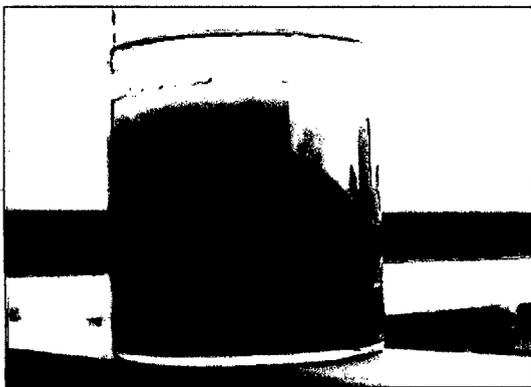
Los sistemas de lodos activados suelen sufrir fallos en el proceso de espesamiento y sedimentación debido a la proliferación excesiva de microorganismos filamentosos con respecto a los microorganismos de formación de flóculos, fenómeno conocido como bulking filamentoso. El bulking filamentoso puede ser controlado por métodos específicos y/o no específicos. Los métodos específicos tienden a abordar las principales causas que deben ser identificados previamente. Ejemplos de aquellos enfoques específicos se les considera selectivos (Chudoba J., et al., 1973) como: modificaciones en la configuración de la planta cambios en las condiciones de operación (Jenkins D., 1993).

Figura 4. Tasa de crecimiento específico de bacterias floculentas y filamentosas

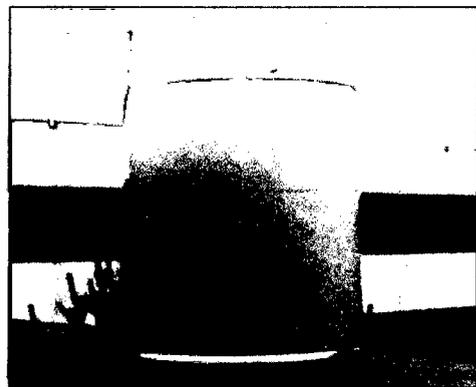


Fuente: Ramalho R., 1996.

Figura 5: Sedimentación de fango activado: (a) con proceso de bulking filamentoso, (b) con proceso de bulking filamentoso controlado.



(a)



(b)

Fuente: Rodriguez R. 1997.

## 2.4 Control de Bulking filamentoso

La cloración es uno de los primeros métodos utilizados para el control del bulking filamentoso (Smith RS. Purdy WC., 1986) y sigue siendo ampliamente utilizado (Switzenbaum MS., 1992). Cuando se utiliza la cloración como un método no-específico para el control de Bulking filamentoso debe ser evaluada la supervivencia relativa entre flóculos formados y microorganismos filamentosos. Entre las bacterias filamentosas esta la *Sphaerotilus natans* como una de las principales causas del bulking (Wanner J., 1994, van der Waarde J., 2001). Por otro lado, *Acinetobacter* es un microorganismo formador de flóculos y se produce de forma natural en el suelo y agua y también están presentes en los sistemas de fangos activados (Converti A., 1995). Diferentes autores señalan que el género *acinetobacter* representa el 48 – 73% del total de población microbiológica en fangos activados. (Buchan L., 1983, Lötter LH., 1985).

Aunque la cloración es muy efectiva para la inactivación de microorganismos filamentosos este no es selectivo porque también afecta procesos de nitrificación y la remoción de fosfatos y DQO (biológico). Además, un exceso de cloro residual también debe evitarse para prevenir la formación de compuestos no deseados como los trihalometanos y otros productos de la desinfección (Switzenbaum MS., 1992). En general, la cloración empieza a bajas concentraciones (alrededor de 5mgCl<sub>2</sub>/l) en el tanque de aireación, y continúa con el incremento de las dosis necesarias. Neethling (1984), encontró que diferentes plantas de fangos activados

dosifican entre 0,7 y 20 mgCl<sub>2</sub> /l para el control del bulking y recomendó no exceder concentraciones arriba de 35 mgCl<sub>2</sub>/l. Lakay et al. (1988) señala dosis de 8 mgCl<sub>2</sub> /gSSV para el control de bulking filamentoso, mientras Jenkins et al. (1993) recomienda dosis entre 1 a 15 mgCl<sub>2</sub>/ gSSV.

Muchos modelos han sido desarrollados y describen la inactivación de microorganismos por desinfectantes como cloro o sus derivados (Hom LW., 1972, Severin BF., 1984, Burn DH., 1987). Sin embargo muchos de ellos no consideran los efectos tales como el decaimiento de la concentración del desinfectante con el tiempo o por la concentración de la biomasa (particulada orgánica). Adicionalmente y dado que estos modelos son empíricos es difícil asignar una constante física. La más simple es un modelo de primer orden en el que se asume que la concentración de cloro tiene un decaimiento exponencial (Jadas A., 1992, Zhang GR., 1992, Rossman LA., 1994). Sin embargo otros autores han sugerido un modelo cinético con dos ecuaciones de decaimiento separadas, uno se definió para las primeras horas y el otro para los tiempos de contacto más grandes (Milenko 1993)

## **2.5 Técnica respirométrica**

La Respirometría es una técnica basada en la medición e interpretación de la tasa de consumo de oxígeno por parte de los microorganismos presentes en el fango activado de una depuradora biológica.

Debido a que el consumo de oxígeno está directamente asociado tanto con la biomasa el crecimiento y el consumo de sustrato, la respirometría es una técnica útil para la monitorización, modelado y control del proceso de lodos activados. Es a partir de los años sesenta que la respirometría se desarrolla más como técnica para el seguimiento y control de procesos.

Durante la última década, la respirometría es cada vez más empleada para obtener características biocinéticas, y en consecuencia es considerada una de las fuentes de información más importantes de modelado de procesos del sistema de lodos activados (Peter A. Vanrolleghem, 2005)

La tasa de respiración por lo general se mide utilizando respirómetros. Estos van desde muy simples (de accionamiento manual de botellas de Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO) hasta instrumentos que realizan automáticamente muestreo, calibración y cálculo de la tasa de respiración.

Todos respirómetros se basan en una técnica para medir la tasa a la cual la biomasa toma el oxígeno disuelto (OD) del líquido. Esto se puede hacer directamente mediante la medición de OD o indirectamente mediante la medición de oxígeno gaseoso. Actualmente, alrededor del 50% de las marcas del respirómetro comerciales se basan en un sensor OD.

## 2.6 Bioquímica de la respirometría

Estrictamente, en términos de bioquímica, la respiración es el trifosfato de adenosina (ATP) generando proceso metabólico en el que los compuestos orgánicos o inorgánicos sirven como donante de electrones y compuestos inorgánicos tales como  $O_2$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , etc., cumplen la función de aceptor de electrones. Si el oxígeno es el último aceptor de electrones, el proceso se llama respiración aeróbica (Milenko 1993)

El ATP se genera por remoción de electrones del sustrato por transferencia a lo largo de la cadena de transporte de electrones de un metabolito portador y en última instancia al oxígeno.

La biomasa, de esta forma, convierte la energía de enlaces intramoleculares, en sustrato de alta energía con enlaces fosfato de ATP. La energía entonces se utiliza para la síntesis de varios componentes moleculares requeridos para el crecimiento y reproducción celular.

## 2.7 Respirometros

Un respirómetro es un instrumento que consiste en un pequeño reactor biológico que sirve para medir velocidades de respiración aerobia de una población microbiana en unas determinadas condiciones. El

respirometro determina la cantidad de oxígeno consumida por unidad de tiempo y de volumen.

Algunos autores consideran al respirometro como un sensor, ya que consiste en una unidad física con una entrada de muestra externa y una salida de resultados (OUR u otros parámetros) obtenida después de un procedimiento interno. Por otra parte, y debido a su condición de reactor biológico, los resultados son extremadamente dependientes de las condiciones de trabajo y, por tanto, puede existir una variabilidad en la salida. Esta variabilidad cuestiona el hecho de que se considere sensor al respirometro y obliga a que los resultados de las respirometrias se acompañen de las condiciones de operación:

- Estado de la biomasa (concentración, pH, T, DQO, edad, etc)
- Tipo de sustrato utilizado
- Temporalidad de la medida de oxígeno (puntual, continua)

La International Water Assotiation (IWA) propuso una clasificación de los respirometros en función de tres parámetros básicos designados por sendas letras:

- La primera letra indica dónde se realiza la medida de oxígeno (G o L)
- La segunda letra indica de qué forma entra el gas en el respirometro (Flowing o static)

- La tercera letra indica la manera que tiene la fase líquida de entrar al respirometro (Flowing o static).

Los respirometros son utilizados para llevar a cabo ensayos de toxicidad, permitiendo establecer el posible efecto toxico que un agua residual con un contenido de sustancia toxica provoca en un fango activo especifico.

La importancia de la respirometría en sistemas de lodos activados se explica a partir desde el ámbito bioquímico. En su clasificación que incluye todos los principios de medición respirométrica. Las diferentes tasas de respiración que se pueden medir permiten analizar algunas variables que pueden deducirse de la tasa de respiración, además permiten proporcionar los conceptos elementales de control para la evaluación de los procesos en dichos sistemas de lodos activados. (Peter Vanrolleghem, et al, 1996)

Un medidor de respiración consiste en un recipiente aireado abierto y una cámara de respiración no aireada cerrada. Se opera con dos sondas de oxígeno resultantes en dos fuentes de información sobre la tasa de consumo de oxígeno, ambos recogidos en una frecuencia alta (Gernaey K. et al. 2001).

El respirómetro se combina con una unidad de titulación que se mantenga el pH de la muestra de lodo activado en un valor constante a través de la adición de ácido y / o base. La cantidad acumulada de ácido

añadido y la base sirve como una fuente de información complementaria sobre los procesos de degradación. Interpretación de los datos respirométricos resultantes de experimentos de validación (adiciones de etilo y urea como fuente de amonio) mostró que la puesta a punto proporcionado datos fiables (Gernaey K. et al. 2001).

## **2.8 Actividad de los microorganismos**

Aunque el cloro es un agente de inactivación muy potente de los microorganismos filamentosos, no es selectiva, afectando los organismos formadores de flóculos y por lo tanto, su eficacia depende de un equilibrio delicado para asegurar que los efectos beneficiosos de cloro sobre el aumento de volumen de control son no compensado por su acción indeseable sobre la eliminación de nutrientes, and la DQO (Smith RS, Purdy WC.1986).

Lakay et al reporta alrededor de 8 mgCl<sub>2</sub>/g VS para el control de Bulking Filamentoso. Analiza además la inactivación y la formación microorganismos en forma de floculos filamentosos en cultivos puros como una función del tiempo mediante pruebas respirométricas. La respirometria es una técnica simple indicada sobre todo para la actividad respiratoria (RA) en fangos especialmente para microorganismos formadores de filamentosos y floculentos, pero que no distingue un cultivo de otro.

Un método adicional para la medición del efecto del agente tóxico en el fango activado es que después de la actividad de la deshidrogenasa se da el transporte de electrones del sistema (ETS). El ETS es el componente común en el camino metabólico de toda bacteria, incluida aquellas litotróficas y metilotróficas, facultativas y estrictamente anaeróbicas y aerobias heterótrofas (Mauss et al 1997).

La actividad ETS puede ser medida por el uso de aceptor artificial de electrón, esta actividad es la que está relacionada con el sistema de transporte de electrón. Las sales de tetrazolium son extensamente utilizadas para medir la actividad respiratoria (RA) de microorganismos tanto en aguas naturales como en aguas para beber, sedimentos y la propia actividad del fango (Tabor PS, Neihof RA. 1982).

La tasa de consumo de oxígeno (OUR), o respiración, para el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales representa la cantidad de oxígeno por unidad de volumen utilizado por unidad tiempo disponible por los microorganismos. Los dos importantes procesos bioquímicos de crecimiento de la biomasa y la eliminación de sustrato están directamente relacionados con la tasa de respiración. En un sistema aeróbico, efectivamente la respirometría enlaza los conceptos de la utilización de oxígeno con la energética metabólica (Gaudy y Gaudy, 1989).

El consumo de oxígeno en un ambiente donde hay actividad microbiana, este representa un parámetro que determina el crecimiento celular o el consumo de sustrato (Gaudy y Gaudy, 1989).

La concentración de oxígeno disuelto (DO) en la fase líquida se monitorea fácilmente y de forma fiable. Un sistema de determinación del DO, consistente en un reactor a escala de laboratorio, automatizado a través de un registrador de datos de interfaz a un ordenador personal.

El balance de masa en la fase líquida puede ser expresada como (Spanjers et al, 1996):

$$\frac{d}{dt}(VC) = Q_{in}C_{in} - Q_{out}C + VK_1a(C' - C) - Vr \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

$C$  = DO concentration in the reactor, mg/l

$C'$  = saturation DO concentration, mg/l

$C_{in}$  = DO concentration in the influent, mg/l

$K_1a$  = oxygen mass transfer coefficient,  $h^{-1}$

$Q_{in}$  = Influent flow rate, l/d

$Q_{out}$  = flow rate leaving the reactor, l/d

$V$  = Liquid volume in the reactor, l

$r$  = OUR or respiration rate of the biomass, mg/

lh

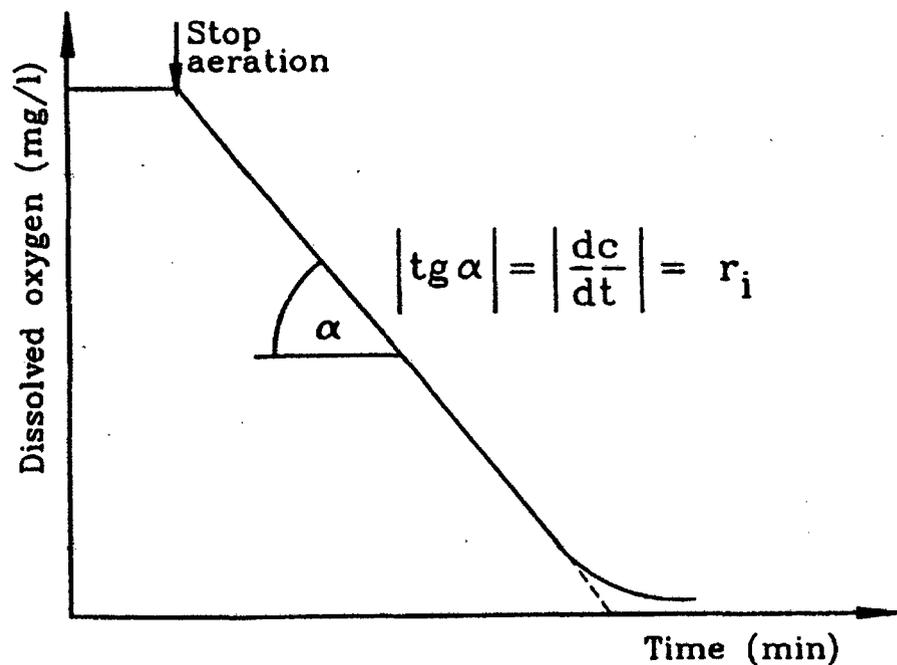
Durante la fase de alimentación del reactor secuencial tipo batch, el segundo término (lado derecho) de la ecuación es igual a cero. En la

práctica, la OUR se estima cuando la entrada de DO se detuvo y la ecuación (1) se reduce a:

$$dC/dt = -r \quad (\text{Ecuación 2})$$

El gradiente de la curva de consumo de oxígeno acumulado representa la velocidad de captación de oxígeno real. La OUR se utiliza para determinar la tasa de crecimiento específico y otros coeficientes cinéticos (Henze et al., 1987).

Figura 6. Representación del seguimiento del OD en el reactor biológico



Fuente: Milenko R. 1993.

## **2.9 Tipos de Respirometros**

Según la bibliografía y dentro de los diferentes tipos de respirometros, los más significativos (Milenko R. 1993) se explican a continuación:

### **1. Respirómetro continuo**

En un respirometro continuo el aire circula de manera continua en el recipiente donde se lleva a cabo la determinación. Se mide el caudal y concentración de oxígeno en el aire de entrada y a la salida de forma permanente, para así poder determinar por diferencia el consumo instantáneo de oxígeno frente a tiempo, pudiendo tener por derivación las velocidades instantáneas de consumo de oxígeno.

### **2. Respirometro discontinuo (Batch)**

En un respirometro discontinuo el aporte de oxígeno depende de dos valores de consigna, un máximo y un mínimo de concentración de oxígeno dentro del recipiente donde se lleva a cabo la respirometria. Se inyecta el aire hasta alcanzar el valor máximo de concentración de oxígeno establecido. Una vez alcanzado se deja de inyectar oxígeno y se espera a que los microorganismos lo consuman, hasta llegar a la consigna mínima. Se mide el tiempo que emplean los microorganismos en consumir el oxígeno con el que se obtiene la velocidad instantánea de consumo de oxígeno.

### **3. Respirómetro manométrico o de Warburg**

En un respirómetro manométrico el oxígeno utilizado se mide con respecto al tiempo, anotando la disminución de presión en el recipiente donde se está realizando la respirometría, que tiene volumen constante, es hermético y se ha de mantener a una temperatura constante. En el recipiente se introduce la muestra a analizar dejando una cámara de aire y, además, se ha de colocar un vaso con una solución de hidróxido de potasio para que absorba el anhídrido carbónico producido. De tal forma que la disminución de la presión sea una medida de la concentración de oxígeno consumido

### **4. Respirómetro volumétrico**

De forma análoga al respirómetro de Warburg, el oxígeno consumido se mide en función de la disminución del volumen que se produzca en el recipiente adecuado que mantenga la presión y la temperatura constantes.

### **5. Respirómetro electrolítico**

El espirómetro electrolítico está formado por un recipiente dotado en su interior de un absolvedor de CO<sub>2</sub> (recipiente con sosa), una célula electrolítica y un manómetro. A medida que los microorganismos

consumen el oxígeno para la oxidación de la materia orgánica, se produce una disminución de presión en el sistema que es registrada por el manómetro. Este, a su vez, a través de un sistema de control, activará la célula electrolítica en función de dicha disminución de presión, tratando así de mantener la presión constante. La cantidad de oxígeno liberado en la electrólisis es proporcional a la cantidad de energía eléctrica que ha sido necesaria suministrar. Registrando esta energía se puede inferir directamente el consumo de oxígeno.

### **III. MATERIALES Y METODO**

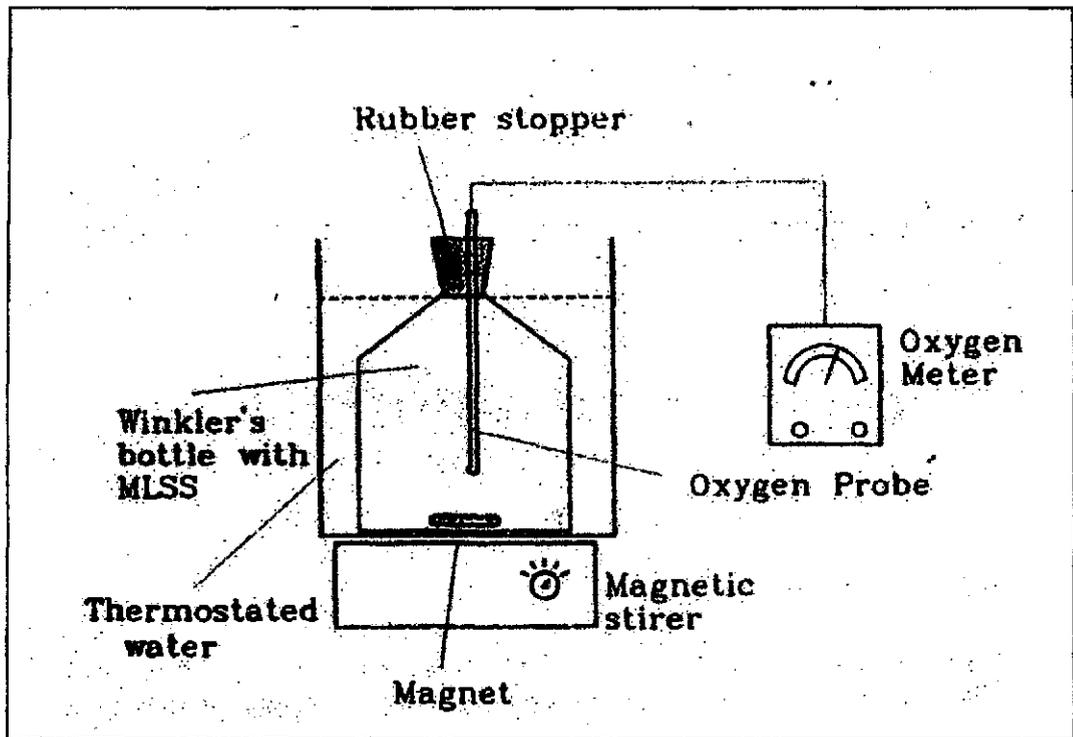
#### **3.1 Materiales y Equipo**

Las pruebas de respirometría se han llevado a cabo con lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales con sistema de lodos activados y sometido a diferentes niveles de exposición de cloro para evaluar los cambios en la actividad biológica del fango por toxicidad del cloro.

Para el desarrollo de las pruebas de respirometría se ha diseñado un respirometro de características similares al planteado por Milenko R., (1993) y que responde en sus características al de un res pirómetro discontinuo.

De acuerdo a la figura 7, contiene una botella (o reactor) donde se desarrollan las pruebas respirométricas, cuenta con un agitador magnético y baño termostático que permite el control de la agitación (por ende la homogenización del licor mezcla) a diferentes revoluciones por minuto, así como la temperatura del ensayo. La sonda que permite el registro de oxígeno disuelto, está incorporada por la parte superior del reactor y es la que hace el seguimiento de la actividad biológica.

Figura 7. Componentes del respirometro para los ensayos de toxicidad



Fuente: Milenko R. 1993

### Componentes del respirometro:

#### a) Reactor

El reactor donde se realizaran las pruebas es una botella de vidrio de 3 litros de capacidad, en la tapa se le ha efectuado tres aperturas que contemplara lo siguiente:

- Apertura para ingreso de sonda para medición de oxígeno disuelto
- Apertura para ingreso de las dosis de cloro
- Apertura para ingreso del oxígeno (proveniente del aire)

## b) Sistema de aireación

La fuente que proveerá de oxígeno es una bomba que sirve como aireador de recipientes de baja capacidad, utilizado en las peceras.

## c) Agitador magnético con parrilla de calefacción

El agitador magnético permitirá agitar el licor mezcla del reactor y controlar la temperatura del ensayo. El agitador es de la marca CAT, y presenta las siguientes características:

Tabla 2. Características del Agitador

| Dimensiones       | Material<br>placa<br>superior | Rango de<br>temperatura | Agitación        | VCA | Hz | Amperios | Watts |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|-----|----|----------|-------|
| 150x157x105<br>mm | Acero<br>Inoxidable           | Hasta 330°C             | 80 a 1600<br>rpm | 220 | 50 | 3.0      | 500   |

*Fuente: Elaboración propia.*

## d) Medidor de oxígeno

Se ha contado con un medidor portátil de oxígeno disuelto de la marca EXTECH Instruments, el mismo que ha permitido registrar las concentraciones del oxígeno en los diferentes ensayos realizados. El equipo presenta las siguientes características:

Tabla 3. Características del medidor de oxígeno

| Dimensiones  | Rango<br>Oxígeno disuelto | Rango de temperatura<br>sonda | Resolución<br>mg/l | Exactitud<br>mg/l |
|--------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|
| 180x72x32 mm | 0 a 20 mg/l               | 0 a 50°C                      | 0,1                | ±0.4              |

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura 8 se puede observar el reactor del respirómetro construido, el cual es de vidrio y presenta tres vías en la parte superior. Por estas vías se ingresa la sonda de aire que permite saturar el medio, una segunda vía es la del ingreso de la sonda del medidor de oxígeno y la última vía es para el ingreso de las diferentes dosis de cloro.

Figura 8. Reactor de vidrio del Respirómetro utilizado para ensayos de toxicidad del cloro



*Fuente: Elaboración propia*

El lodo utilizado proviene de un reactor biológico (sistema de fango activado) que trata agua residual urbana, al cual se le ha efectuado lo siguiente:

- a) Lavado del lodo con agua destilada, con la finalidad de remover posibles restos de sustrato contenido en el propio lodo aerobio, evitando que pueda darse cualquier interferencia en las pruebas respirométricas.
- b) Tamizado del lodo lavado con características floculentas: Que evita el paso de cualquier material ajeno al lodo y que pueda perjudicar la mezcla en el reactor biológico
- c) Caracterización del contenido de sólidos:
  - Determinación de la concentración de ST
  - Determinación de la concentración de SV
  - Determinación de la relación SV/ST.

### **3.2 Metodología para la prueba respirométrica**

#### **3.2.1 Preparación de las muestras para los ensayos**

Antes de llevar a cabo los ensayos con el respirometro se han realizado algunos preparativos previos. Debe desarrollarse las siguientes acciones:

- a) Eliminar del lodo la presencia de sólidos gruesos o desperdicios, para lo cual el fango debe ser tamizado antes de poner la muestra en el reactor.

- b) Asegurar que el fango se encuentre preferentemente en fase endógena. Esto se consigue si se obtiene lodo de la salida del reactor biológico o a la llegada del lodo al decantador secundario. Para que el fango alcance condiciones endógenas se debe dejar un mínimo de 1 hora aireándose, para ello se utiliza un aireador portátil.

### 3.2.2 Ensayo de respirometría

Para el ensayo se ha seguido el siguiente procedimiento:

- 1) Se introduce el lodo en el reactor del respirometro, para los ensayos se ha establecido un volumen de lodo, calculado para alcanzar una concentración de 2g SV/l (no debe ser inferior a 1,5 gSV/l), luego se pone en marcha el sistema de aireación durante un tiempo (para los ensayos se ha aplicado un periodo de 20 minutos).
- 2) Vertido de un volumen de agua destilada hasta alcanzar un volumen de 1 litro del reactor, quedando un volumen similar de aire.
- 3) Ingreso de aire por un tiempo (aproximadamente 10 minutos) hasta alcanzar niveles de saturación, además regulando la agitación (100 r.p.m.), la temperatura (20°C) y su pH inicial ( $7 \pm 0,2$ )
- 4) Una vez transcurrido el tiempo de estabilización del contenido de oxígeno disuelto (OD) y que asegura que no haya sustratos que puedan distorsionar en ensayo se procede a apagar el sistema de aireación y proceder a registrar el OD.

- 5) La concentración de oxígeno empezara a descender como consecuencia de estar en la fase endógena (respiración endógena), su evolución es registrada para su posterior análisis de los resultados.
- 6) Para determinar la toxicidad del cloro, se ha añadido distintos volúmenes de una solución de hipoclorito de sodio (550 mg  $\text{Cl}_2/\text{l}$ ): 5ml, 10 ml, 15ml, 18,5 y 20 ml, este proceso se realiza a los 15 minutos de detener la aireación y comprobarse que viene desarrollando la fase endógena.
- 7) Después de registrarse las concentraciones de oxígeno disuelto, la pendiente que se registre corresponde a la velocidad de consumo de oxígeno o tasa de respiración (OUR).

Los resultados obtenidos fueron analizados por el programa estadístico Statistical Package for the Social Sciences (**SPSS 20**), en cuanto a su correlación y regresión.

## IV. RESULTADOS

Para evaluar la toxicidad de cloro en la actividad biológica de un fango activado (proveniente de una planta de planta de tratamiento de agua residual urbana) se han desarrollado siete (7) ensayos y cuyas condiciones se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Características de los ensayos de respirometría

| Ensayo | Condiciones de los ensayos realizados |                  |                    |
|--------|---------------------------------------|------------------|--------------------|
|        | Concentración de cloro (mg/l)         | Temperatura (°C) | Agitación (r.p.m.) |
| 1      | 0                                     | 20               | 100                |
| 2      | 2,75                                  | 20               | 100                |
| 3      | 5,5                                   | 20               | 100                |
| 4      | 8,25                                  | 20               | 100                |
| 5      | 10,2                                  | 20               | 100                |
| 6      | 11                                    | 20               | 100                |
| 7      | 10,2                                  | 25               | 100                |

*Fuente: Elaboración propia.*

El fango activado utilizado en los diferentes ensayos presenta características de un fango floculento. La concentración tanto de sólidos totales como volátiles fueron determinados de acuerdo al Método 1684 de la U.S. EPA (U.S. EPA, 2001), y que se pueden ver en la tabla 5.

Tabla 5. Características del fango activado utilizado en los ensayos de respirometría

| ST (mg/l) | SV (mg/l) | SV/ST |
|-----------|-----------|-------|
| 3800      | 2850      | 0,75  |

*Fuente: Elaboración propia.*

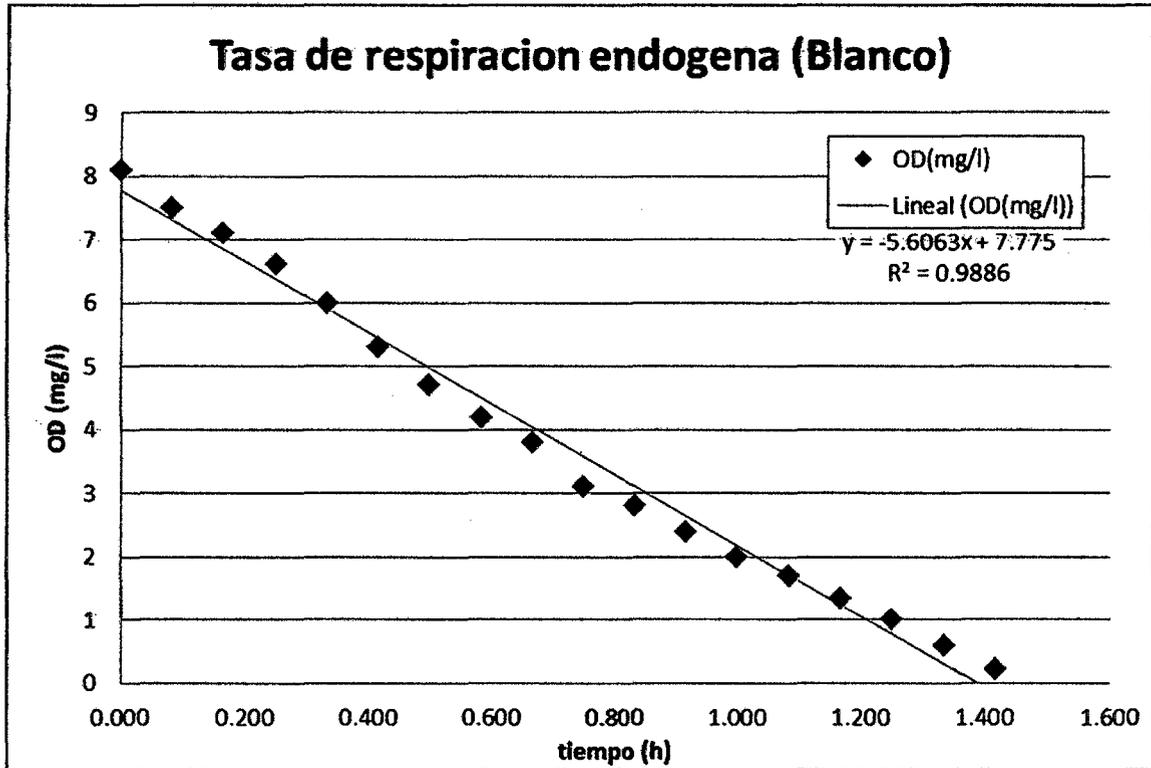
La concentración fijada para cada uno de los ensayos de respirometría fue de 2 g SV/l en el reactor del respirometro.

#### 4.1 Tasa de respiración endógena

Para la determinación de la respiración endógena se ha tomado en cuenta el ensayo sin cloro (o **blanco**); la disminución paulatina del contenido de OD después de suspender la aireación confirma la actividad biológica del lodo. Esta disminución de la concentración del oxígeno disuelto respecto al tiempo indica la tasa de respiración endógena (OUR).

La prueba ha permitido comprobar que se desarrolla la etapa de respiración endógena del lodo, sin la presencia de sustratos que puedan interferir los resultados, esto se muestra en la gráfica 1.

Grafica 1: Respirograma del lodo activado sin dosis de cloro (blanco).



Fuente: Elaboración propia.

Tasa de respiración endógena (OUR):

La TRE se obtiene de la pendiente que registra variación de la concentración del OD en el tiempo:

$$\text{OUR} = 5,61 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}\text{h}^{-1}$$

Tomando en cuenta que la concentración de sólidos volátiles es de 2 g/l, se establece que la tasa de respiración endógena específica (OUR<sub>e</sub>) es de:

$$\text{OUR}_e = 2,8 \text{ mg O}_2/\text{mg SV-h}$$

## 4.2 Nivel de toxicidad de cloro

Para evaluar la toxicidad del cloro en la actividad del lodo se ha tomado en cuenta los ensayos 2, 3, 4, 5, 6 y 7, que permiten registrar distintas concentraciones de oxígeno disuelto en el reactor cuando se añaden diferentes dosis de cloro, esto se puede apreciar en la tabla 6.

Tabla 6. Condiciones de los ensayos de respirometría a 20°C

| <b>Ensayo</b>   | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7 (*)</b> |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Volumen de solución con cloro (550mg Cloro/l) añadido, ml | 0        | 5        | 10       | 15       | 18,5     | 20       | 18,5         |
| Concentración de Cloro, mg/l                              | 0        | 2,75     | 5,5      | 8,25     | 10,2     | 11       | 10,2         |

(\*): Ensayo a 25°C.

*Fuente: Elaboración propia.*

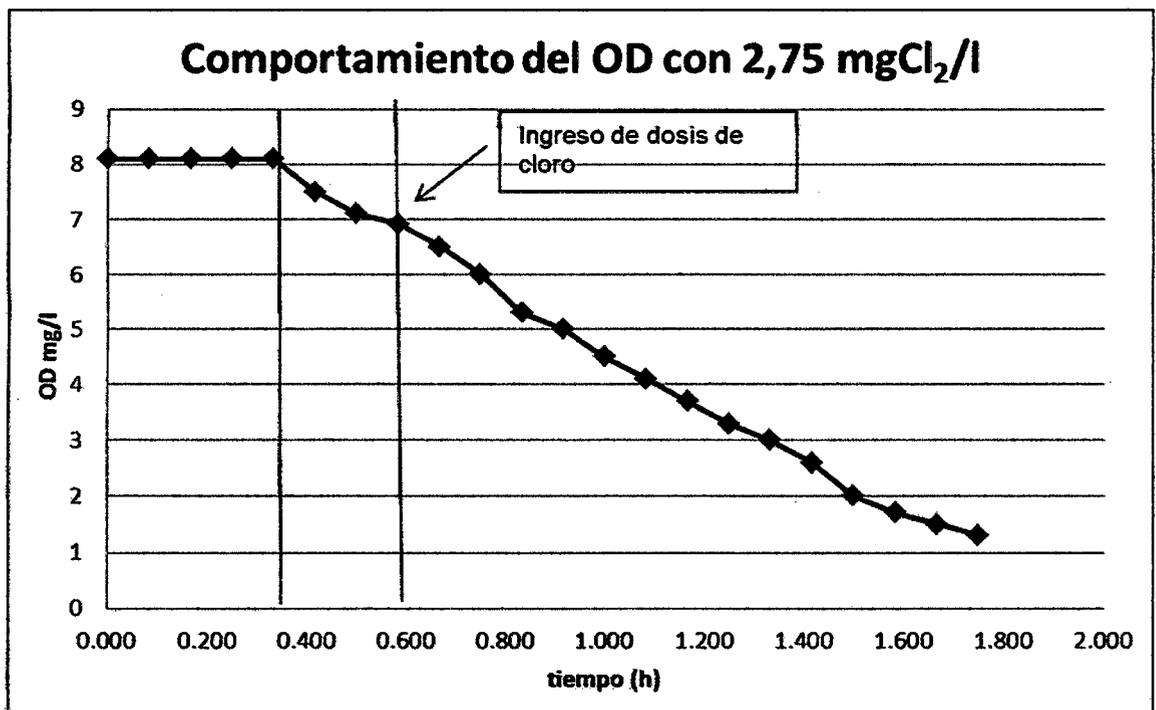
### 4.2.1 Comportamiento del OD a 20°C

Los ensayos desarrollados han permitido comprobar que la presencia de cloro afecta la actividad biológica del lodo, cuanto más cloro se tiene en el medio, es mayor la disminución de la tasa de respiración endógena, a tal extremo de anular dicha actividad cuando se experimenta a 11 mg de cloro/l.

El comportamiento del OD en las diferentes ensayos realizados muestran una disminución en la utilización del oxígeno disuelto del medio por parte de los microorganismos presentes en el lodo, esta tendencia se puede observar en las gráficas 2, 3, 4, 5 y 6, en las que se aprecia una disminución paulatina en la velocidad de consumo de oxígeno en el transcurso del tiempo.

Cuando se añade 5ml de la solución que contiene cloro y que corresponde a una concentración de 2,75 mg cloro/l se puede notar una disminución en el consumo normal de oxígeno por parte de los microorganismos presentes en el fango activado en el ensayo de respirometría, esto se puede apreciar en el grafico 2.

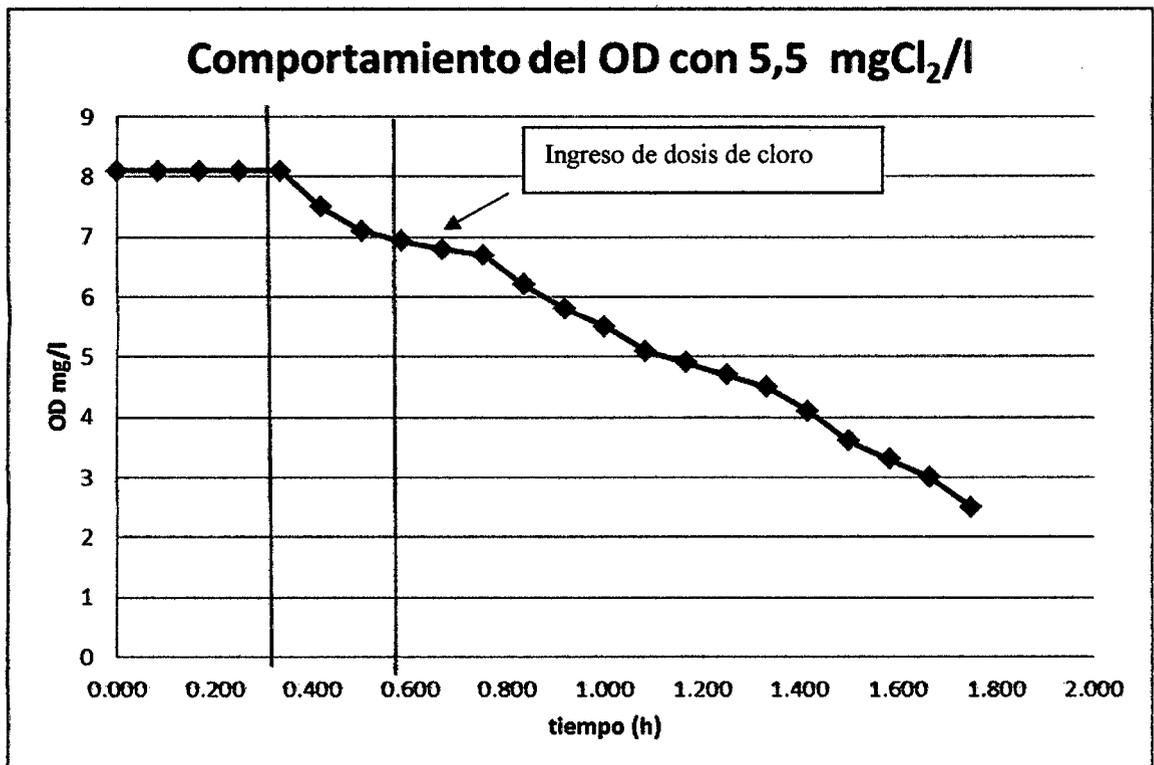
Grafica 2. Respirograma del lodo activado con dosis de 2,75 mgCl<sub>2</sub>/l.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, cuando se añade 10ml de la solución que contiene cloro y que corresponde a una concentración de 5,55 mg cloro/l es más notorio la caída en el consumo de oxígeno parte de los microorganismos presentes en el fango activado en el ensayo de respirometría, esto se puede apreciar en el grafico 3.

Grafica 3. Respirograma del lodo activado con dosis de 5,5 mgCl<sub>2</sub>/l.

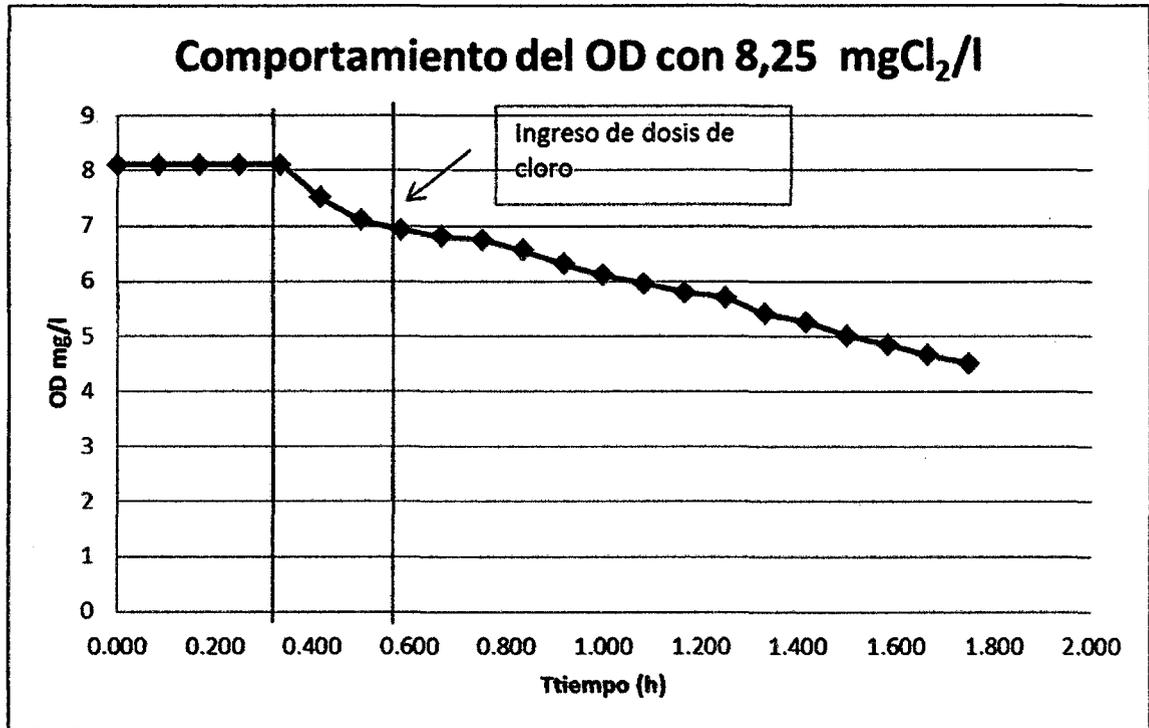


Fuente: Elaboración propia.

En el ensayo donde se le añade 15ml de la solución que contiene cloro y que corresponde a una concentración de 8,25 mg cloro/l se puede notar que se registra una baja variación en la concentración de oxígeno disuelto del medio, lo que corresponde a un bajo consumo de oxígeno

parte de los microorganismos presentes en el fango activado en el ensayo de respirometría, esto se puede apreciar en el grafico 4.

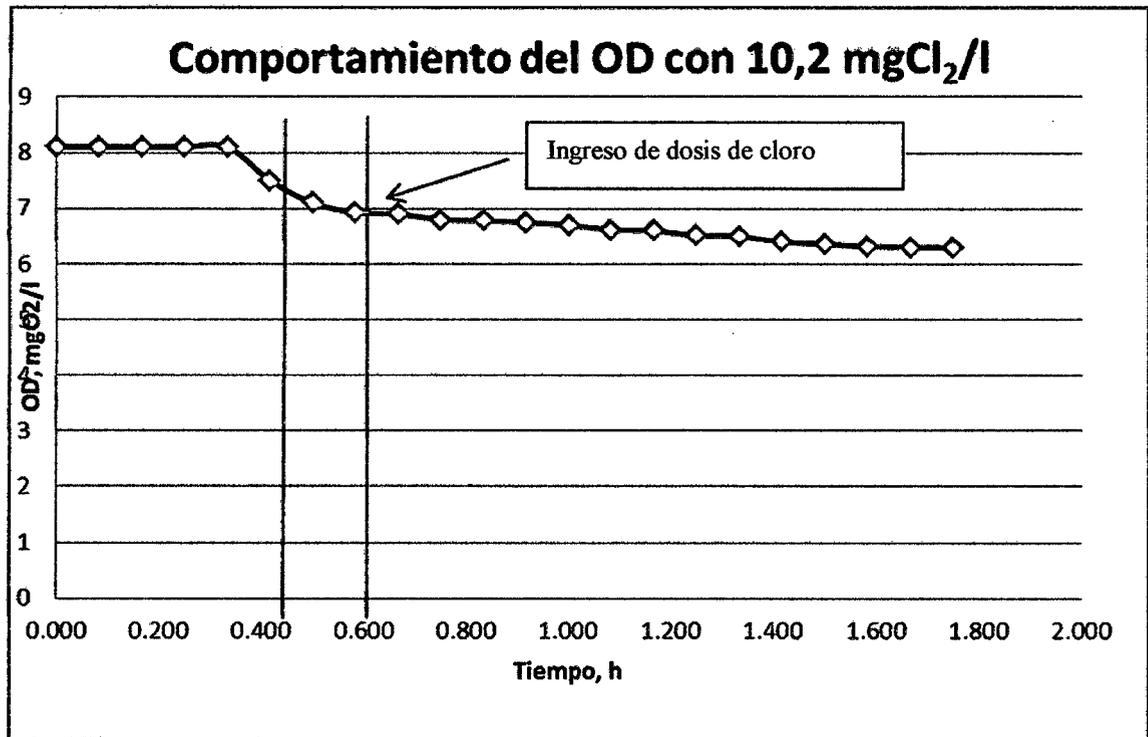
Grafica 4. Respirograma del lodo activado con dosis de 8,25 mgCl<sub>2</sub>/l.



Fuente: *Elaboración propia.*

Cuando se le añade 18,5ml de la solución que contiene cloro y que corresponde a una concentración de 10,2 mg cloro/l se puede notar que se registra una escasa variación en la concentración de oxígeno disuelto del medio y que corresponde a su vez a un escaso consumo de oxígeno parte de los microorganismos presentes en el fango activado en el ensayo de respirometría, esto se puede apreciar en el gráfico 5.

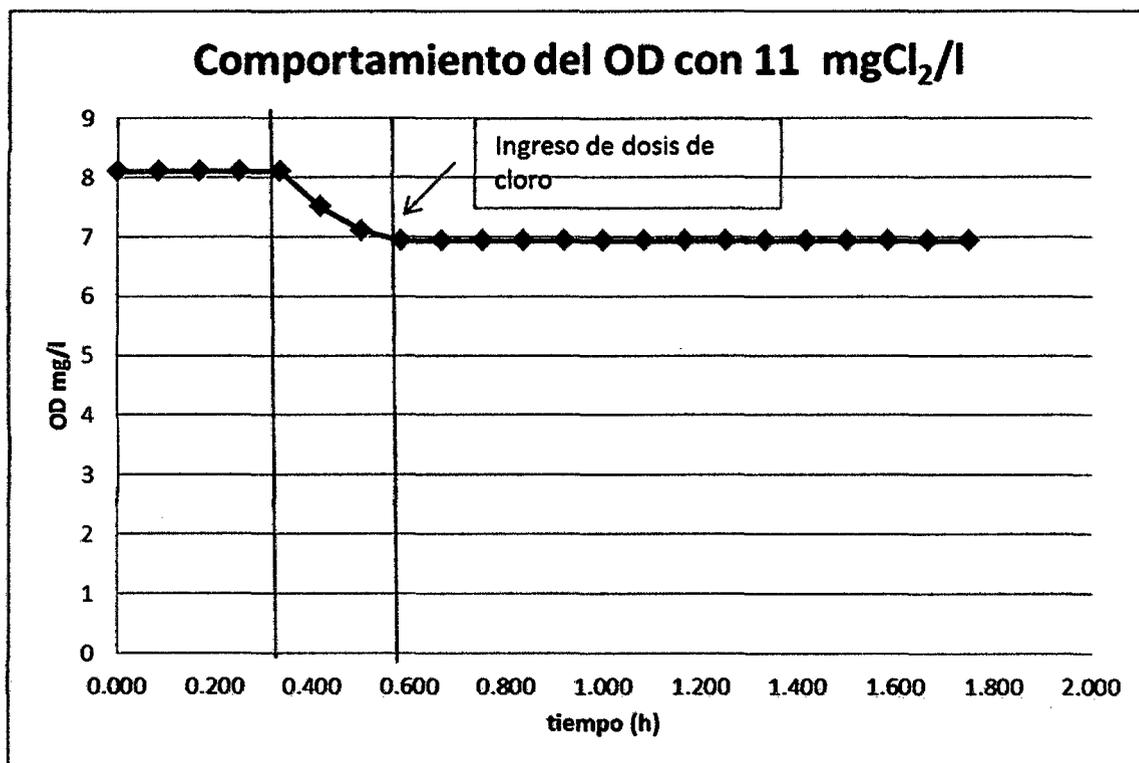
Grafica 5. Respirograma del lodo activado con dosis de 10,2 mgCl<sub>2</sub>/l



Fuente: *Elaboración propia.*

En el ensayo donde se le añade 20ml de la solución que contiene cloro y que corresponde a una concentración de 11 mg cloro/l se puede notar que no se presenta ninguna variación en la concentración de oxígeno disuelto del medio, lo que indica que la actividad biológica del fango se ha perdido, esto se puede apreciar en el grafico 6.

Grafica 6. Respirograma del lodo activado con dosis de 11 mgCl<sub>2</sub>/l.



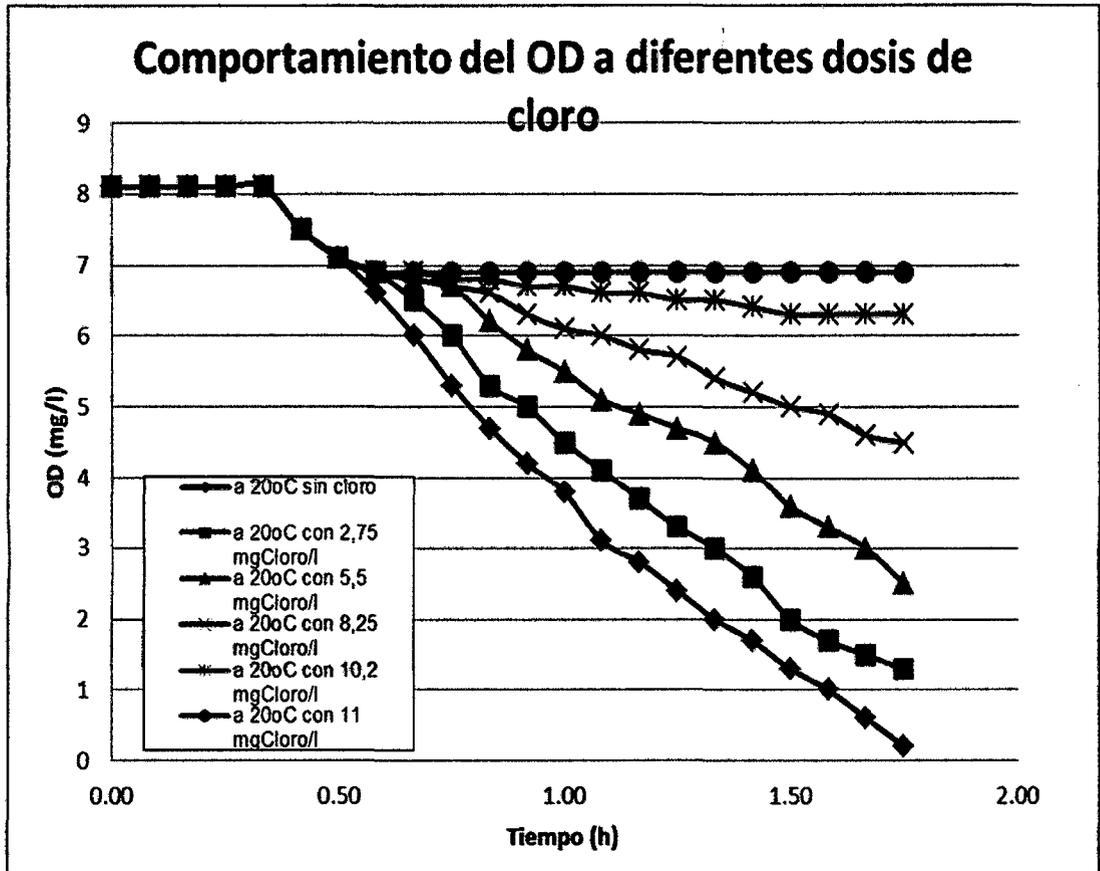
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que después de varias dosis de cloro se registran continuos decaimientos en la actividad del lodo, alcanzándose una nula actividad cuando se dosifica 20 ml de cloro al reactor, esto corresponde como se indicó antes a una concentración de 11 mg l<sub>2</sub>/l en el licor mezcla.

En la gráfica 7 se muestra el comportamiento del oxígeno disuelto en el reactor durante las diversas pruebas respirométricas a las cuales se ha

sometido el lodo aerobio para determinar la toxicidad del cloro sobre la actividad biológica.

Grafica 7. Respirograma del lodo activado a diferentes dosis de cloro.



Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de respirometría dan muestra de ser una adecuada herramienta para la evaluación de los niveles de toxicidad de diversas sustancias que puedan en algún momento inhibir la actividad biológica de los microorganismos, dicha información es importante para las labores propias en la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales que contenga componentes biológicos aerobios, así mismo

en las mejoras que pueden darse en el diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Se tuvieron algunas dificultades para el desarrollo de las pruebas respirometricas, especialmente para garantizar la calidad del lodo. El lodo debe ser mantenido en condiciones aerobios en todo momento el cambio en esta condición puede influir en la determinación del nivel de toxicidad, para evitar esto se ha tenido que mantener en condiciones aerobias desde su obtención de la planta de tratamiento hasta el inicio de la prueba, para ello se ha mantenido una concentración de oxígeno disuelto no menor a 2 mg/l.

### **Decaimiento en la Respiración endógena**

La tasa de respiración endógena se ve afectada conforme se incrementa la dosis de cloro. Esta tasa de respiración endógena se ve anulada cuando se registra una dosis de 11 mgCl<sub>2</sub>/l en el ensayo.

En consecuencia la Toxicidad del cloro seria de:

|                                |   |                             |
|--------------------------------|---|-----------------------------|
| $C_{\text{toxica}}$            | = | 11 mg Cl <sub>2</sub> /l    |
| $C_{\text{toxica especifica}}$ | = | 5,5 mgCl <sub>2</sub> /g SV |

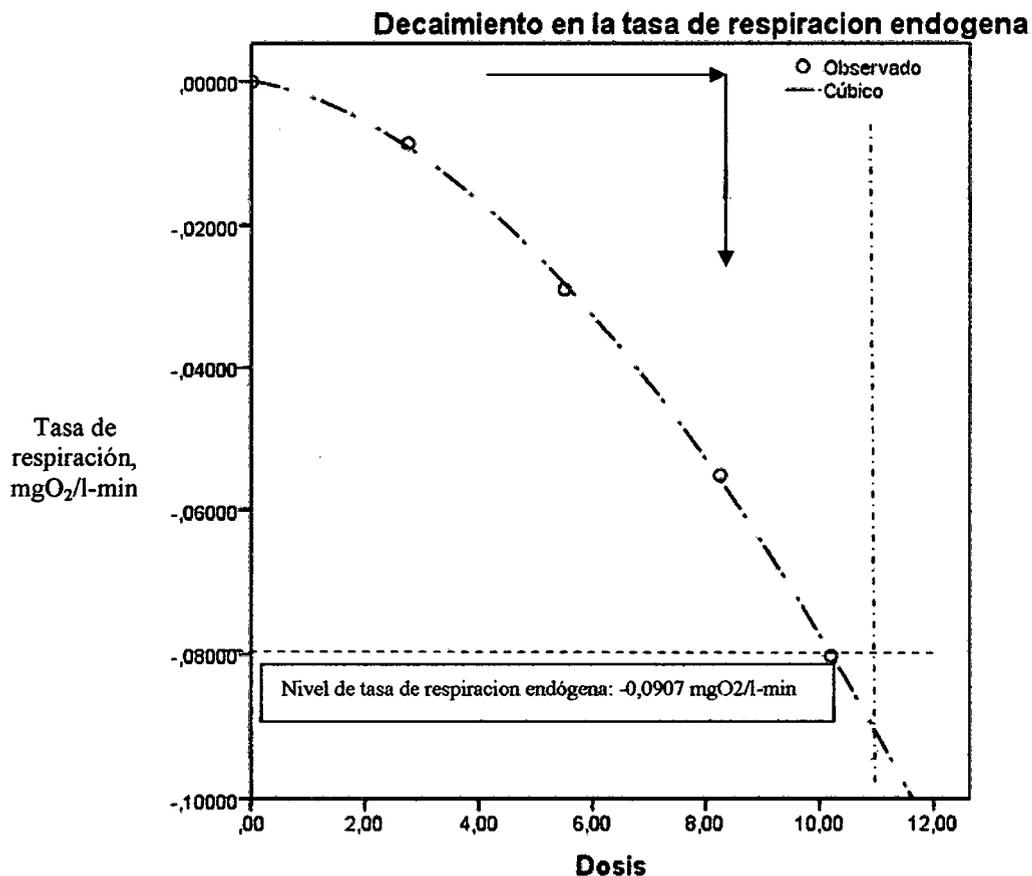
La concentración de toxicidad obtenida está comprendida en el rango establecido por Neethling (1984), y Lakay et al (1988) que son de 0,7 a 20 mgCl<sub>2</sub>/l. Por otro lado, la concentración especifica de toxicidad obtenida (de 5,5 mgCl<sub>2</sub>/gSV), está comprendido en el rango que estableció Jenkins

(1993), es decir entre 1 a 15 mgCl<sub>2</sub>/gSV para el control de bulking filamentoso

En consecuencia queda confirmada la hipótesis planteada para el presente estudio de que la toxicidad del cloro ocurre, controlando la actividad biológica del fango activado, especialmente cuando se hace presente la condición de bulking filamentoso.

El efecto de la toxicidad del cloro en la tasa de respiración endógena se puede observar en la siguiente grafica 8 y que sigue el comportamiento de una función cubica.

Grafica 8. Decaimiento en la respiración endógena



Fuente: Elaboración propia.

## 4.2.2 Influencia de la Temperatura en la Toxicidad del cloro

### Influencia de la Temperatura

La influencia de la temperatura en el nivel de toxicidad (para la actividad del lodo) se ha podido evaluar a una misma dosis (10,2 mgCl<sub>2</sub>/l) tanto a 20°C como a 25°C.

Cuando la experiencia se hace a una mayor temperatura (de 25°C), la toxicidad disminuye, esto es debido probablemente a que el cloro se volatiliza con lo cual disminuye su efecto.

La disminución de la tasa de respiración endógena por efecto de la temperatura ha sido evaluada a la dosis de 10,2 mgCl<sub>2</sub>/l tanto a 20°C como a 25°C y se puede analizar en la tabla 7.

Tabla 7. Disminución en la tasa de respiración por efecto de la temperatura

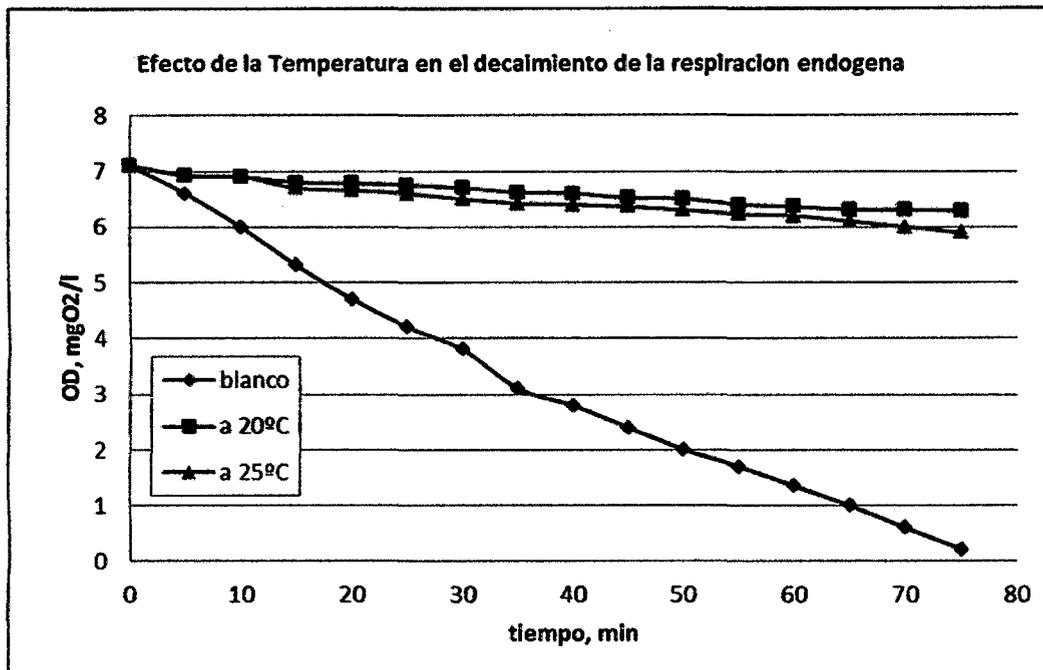
|   | Blanco  | a 20°C  | a 25°C  |
|---|---------|---------|---------|
| Tasa de respiración endógena, mgO <sub>2</sub> /l-min | -0.0907 | -0.0104 | -0.0142 |
| Disminución de la tasa de respiración, %              | -       | 88.5    | 84.3    |

*Fuente: Elaboración propia.*

Esta disminución corresponde a 4,75 % (ver tabla 7), donde se puede apreciar una disminución en un poco más de 4 unidades porcentuales aproximadamente

Esta poca influencia de la temperatura en la actividad biológica del lodo se puede ver en la gráfica 9.

Grafica 9. Influencia de la temperatura en el decaimiento de la respiración endógena



Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Evaluación estadística de los resultados

#### Correlación de Pearson

Utilizando el programa SPSS 20 y efectuando la Correlación de Pearson se tiene una Significancia muy significativa en los datos de cada prueba, excepto el ensayo a una concentración de 11ml cloro /l. Las correlaciones

bivariadas determinadas son superiores a 0,993 de los datos obtenidos, lo cual indica una significancia muy significativa (ver tabla 8).

Tabla 8. Correlación de Pearson de los ensayos a 20°C

| Variable                               | Correlación de Pearson |
|--|------------------------|
| Tiempo                                 | 1                      |
| Ensayo sin cloro                       | -0,993                 |
| Ensayo a 2,75 mlCl <sub>2</sub> /l     | -0,997                 |
| Ensayo a 5,50 mlCl <sub>2</sub> /l     | -0,995                 |
| Ensayo a 8,25 mlCl <sub>2</sub> /l     | 0,998                  |
| Ensayo a 10,2 mlCl <sub>2</sub> /l     | -0,989                 |
| Ensayo a 11 mlCl <sub>2</sub> /l       | -0,420                 |
| Ensayo a 10,2 mlCl <sub>2</sub> /l (*) | -0,988                 |

(\*): Ensayo a 25°C

*Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados de la correlación de Pearson nos muestra que no hay mayor influencia por la temperatura cuando se experimenta a igual dosis de cloro (10,2 mlCl<sub>2</sub>/l).

## V. DISCUSION

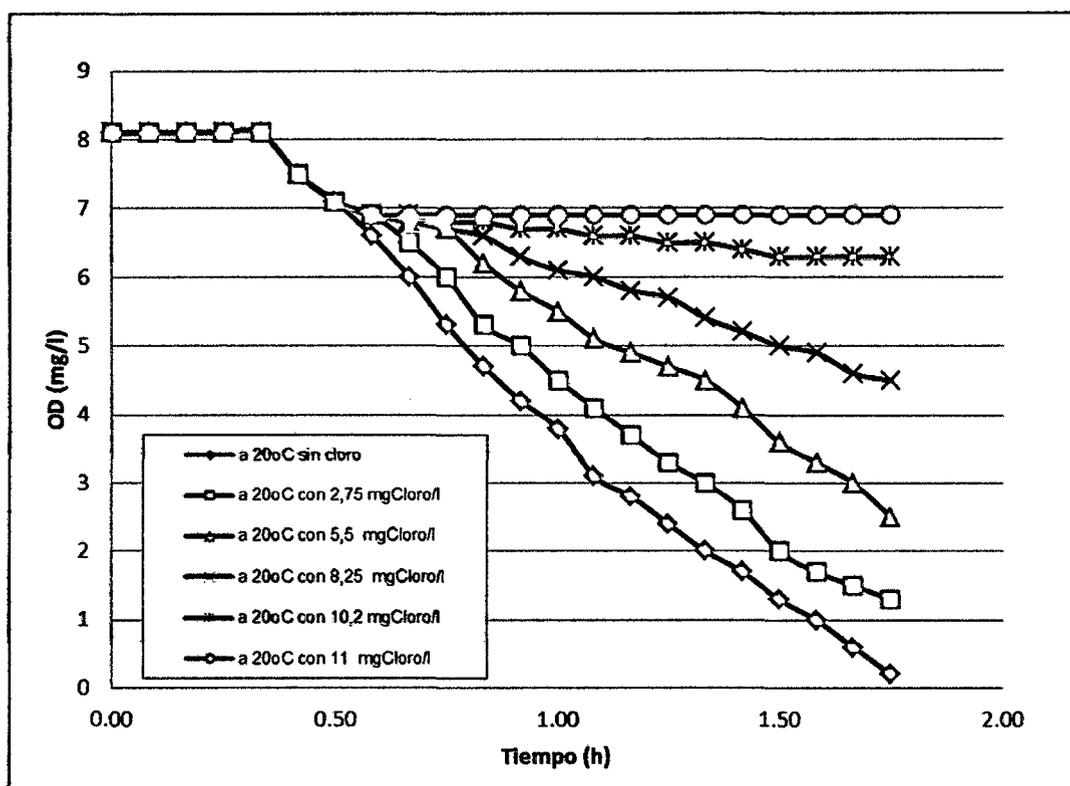
La presente investigación ha permitido alcanzar los objetivos planteados, especialmente en un mayor nivel de entendimiento de los ensayos de respirometría aplicados al control de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

La variación de la concentración de oxígeno disuelto (OD) durante las pruebas de respirometría muestran el efecto de la presencia del cloro (como se aprecia en la gráfica 10), lo cual indica la toxicidad del cloro sobre los microorganismos presentes en el fango activado. Cuando el fango se expone a una concentración de cloro de 11 mgCl<sub>2</sub>/l en el licor mezcla y que corresponde a 5,5 mgCl<sub>2</sub>/gSV en el licor mezcla, permite establecer el nivel de toxicidad del cloro en la actividad biológica del fango activado, este valor obtenido es muy cercano al establecido por Lakay (1988), que reporta alrededor de 8 mgCl<sub>2</sub>/g VS para el control de Bulking Filamentoso.

Los resultados obtenidos durante las pruebas explican que el seguimiento del consumo de oxígeno por parte de los microorganismos presentes en el fango activado explican su comportamiento frente a un tóxico. Por ende, estos ensayos dan muestra entonces que las pruebas de respirometría constituyen una adecuada herramienta para la evaluación de los niveles de toxicidad de diversas sustancias que puedan en algún momento inhibir la actividad biológica de los microorganismos, dicha información es importante para las labores propias en la

operación de una planta de tratamiento de aguas residuales que contenga componentes biológicos aerobios, así mismo

Grafica 10. Comportamiento del OD a diferentes dosis de cloro



Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de respirometría efectuadas para el fango activado han permitido también evaluar la influencia de la temperatura en el nivel de toxicidad, en este caso del cloro.

La influencia de la temperatura en el nivel de toxicidad (para la actividad del lodo) se ha podido evaluar a una misma dosis (10,2 mgCl<sub>2</sub>/l) tanto a 20°C como a 25°C.

Cuando la experiencia se hace a una mayor temperatura (de 25°C), la toxicidad disminuye, esto es debido probablemente a que el cloro se volatiliza con lo cual disminuye su efecto.

La disminución de la tasa de respiración endógena por efecto de la temperatura ha sido evaluada a la dosis de 10,2 mgCl<sub>2</sub>/l tanto a 20°C como a 25°C, la disminución en la tasa de respiración endógena es notoria cuando ya nos encontramos cerca de la concentración de toxicidad.

Ante el incremento de 5°C en la temperatura del ensayo (con dosis de 10,2 mg Cl<sub>2</sub>/l) se ha podido registrar una disminución de 4,75 % en el efecto del cloro sobre la tasa de respiración endógena respecto siempre al ensayo sin cloro.

## 5.1 Conclusiones

1. El respirometro construido y operado para las pruebas desarrolladas muestra una versatilidad para la evaluación del nivel de toxicidad de microorganismos, especialmente para lodo proveniente de una planta de lodos activados con características floculentas.
2. En las pruebas de respirometria se ha comprobado que el seguimiento del oxígeno disuelto, cuando se añade un toxico, correlaciona el efecto de esta sustancia (cloro) en la actividad biológica.
3. La Tasa de respiración endógena (OUR) registrada es de 5,61 mgO<sub>2</sub> l<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, mientras la especifica OUR<sub>e</sub> = 2,8 mg O<sub>2</sub>/g SV-h.

4. La tasa de respiración endógena se ve afectada conforme se incrementa la dosis de cloro, experimentando una disminución cuanto mayor es la concentración del cloro en el licor mezcla (del reactor) y se vuelve nula cuando se tiene una concentración del toxico de 11 mgCl<sub>2</sub>/l, y que correspondiente a 5,5 mgCl<sub>2</sub>/gSV.
5. El valor de toxicidad del cloro de 5,5 mgCl<sub>2</sub>/sSV, sobre la tasa de respiración endógena del fango activado para el presente estudio está comprendido en el rango que estableció Jenkins (1993), es decir, entre 1 a 15 mgCl<sub>2</sub>/gSV para el control de bulking filamentoso, así como próximo a Lakay (1988), que reporta alrededor de 8 mgCl<sub>2</sub>/g VS para el control de Bulking Filamentoso.
6. La correlación de los datos obtenidos diferentes ensayos son muy significativos (> 0,993), esto en los se deduce cuando se hace el análisis estadístico correspondiente (Correlación de Pearson).
7. El efecto de la temperatura en el índice de toxicidad no aumenta con la temperatura (de 20°C a 25°C), por el contrario disminuye en torno a 4,75% esto es debido probablemente a la volatilización del cloro con la temperatura, por lo que desciende su nivel de efectividad.
8. En las pruebas respirometricas se ha comprobado una estabilización del medio en cuanto a su pH, el cual se ha mantenido en 7 ± 0,2.
9. Los ensayos de respirometria han constituido una herramienta confiable y versátil para el evaluar el nivel de toxicidad del cloro en la actividad biológica del fango activado, respondiendo así a la hipótesis planteada en

la investigación sobre la aplicación de las técnicas respirométricas para evaluar la toxicidad del cloro en la actividad biológica del fango activado.

10. Finalmente, la investigación ha permitido alcanzar los objetivos planteados, permitiendo disponer ahora de un mayor conocimiento en los ensayos respirométricos como herramienta útil para el control de la toxicidad de algunas sustancias en el manejo de Plantas de tratamiento de Aguas Residuales.

## **5.2 Recomendaciones**

1. En las pruebas de respirometría debe controlarse adecuadamente la temperatura, especialmente cuando la sustancia a evaluar su toxicidad en el lodo o fango activado presenta una presión de vapor alta.
2. El sistema de agitación debe ser mantenida de manera uniforme durante los ensayos.
3. Sería importante contar con una mayor información sobre los diferentes tipos de microorganismos presentes en el lodo y evaluar la respuesta de cada uno de ellos ante la presencia de cloro, especialmente de aquellos microorganismos floculentos y filamentosos.
4. Las pruebas respirométricas podrían ser planteadas para evaluar la toxicidad de otras sustancias inhibitorias de la actividad biológica del lodo presente en las plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente cuando se encuentran fuera del rango de respiración endógena.

## VI. REFERENCIALES

1. Banco Mundial, Perú – La Oportunidad de un País Diferente, Prospero Equitativo y Gobernable. Banco Mundial, Lima- Perú. 2006.
2. Buchan L. Possible biological mechanism of phosphorus removal. *Water Sci. Technol.* 1983;15:87-103.
3. Burn DH Modeling coliform bacteria subject to chlorination. *J Environ Eng* 1987;120:585-94.
4. Chudoba J. Grau P., Ottova. Control of activated sludge filamentous bulkingII: selection of micro-organisms by means of selector. *Water Res* 19; 7:1389-406.
5. Converti A, Rovatti M, Del Borghi M. Biological removal of phosphorus from wastewater by alternating aerobic and anaerobic conditions. *Water Res.* 1995; 29:263-9.
6. Gaudy Jr A. F. and Gaudy E. T. **ELEMENTS OF BIOENVIRONMENTAL Engineering.** Engineering Press, Inc, San Jose, California, USA. 1988.
7. Gernaey K. et al. Activated sludge monitoring with combined respirometric-titrimetric measurements. *Water Research*, 2001;Volume 35, pages 1280-1294.
8. Henze M., Grady C. P. L. Jr, Gujer W., Marais GvR and Matsuo T. IAWPRC Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment. Activated Sludge Model Scientific and Technical Reports No.1. IAWPRC, London 1987;Nº1.
9. Hernandez, A. **DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.** 4ª. Edición, Editorial Paraninfo S.A., España. 1998.

10. Hom LW. Kinetics of chlorine disinfection of an ecosystem. J Sanitary Eng Div ASCE ,1972;98:183-94.
11. Jadas-Hecart A, Morer A, Stitou A, Boulliot P. The chlorine demand of a treated wastewater. Water Res 1992;26:1073-84.
12. Jenkins D., Richard MG, Daigger GT. MANUAL ON THE CAUSES AND CONTROL OF ACTIVATED SLUDGE BIULKING AN FOAMING, 2nd ed., Michigan, Chelsea: Lewis Publishers, 1993.
13. Lakay MT, Wentzel MC, Ekama GA, Marais G. R. Bulking control with chlorination in a nutrient removal activated sludge system. Water SA; 1988;volume 14:35–42.
14. Lotter LH. The role of bacterial phosphate metabolism in enhanced phosphorus removal from activated sludge process. Water Sci. Technol. 1985;17:127-38.
15. Mauss P, Drouin JF, Pons MN, Vivier H, Germain P, Louvel L, Vanhoutte B. Location of respiration activity in filamentous bacteria by image analysis. Biotechnol Technol. 1997;Volume 11(11):pages 813–7.
16. Metcalf & Eddy,. INGENIERIA SANITARIA- EVACUACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES. Madrid McGraww Hill. 2v. España. 1995.
17. Michael R. Activated sludge microbiology problems and their control. 20<sup>TH</sup> ANNUAL USEPA NATIONAL OPERATOR TRAINERS CONFERENCE. BUFFALO, NY. June 8, 2003
18. Milenko Ros, RESPIROMETRY OF ACTIVATED SLUDGE, Technomic Pub. Co. 1993.

19. Neethling JB, ASCE AM, Chung YC, Jenkins D. Activated sludge chlorine reactions during bulking control. J Environ Eng 1987;113:134-46.
20. Neethling JB. THE CONTROL OF ACTIVATED SLUDGE BULKING BY CHLORINATION. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering. University of California, Berkeley, CA, USA, 1984.
21. Peter A. Vanrolleghem. PRINCIPLES OF RESPIROMETRY IN ACTIVATED SLUDGE WASTEWATER TREATMENT. International Association on Water Quality, London. 2005.
22. Peter Vanrolleghem, et al, *Respirometry in control of the activated sludge*. Water Quality International. 1996;Volume 34, pages 117 – 126.
23. Ramalho, R. S. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Barcelona: Editorial Reverté S.A. 1996.
24. Rodriguez Flores R. DESARROLLO DE TECNOLOGIA UASB DE DOBLE ETAPA (UASB-DE) – TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUA RESIDUAL URBANA. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. Spain. 1997.
25. Rossman LA, Clark RM, Grayman WM. Modelling chlorine residual in drinking water distribution systems. J Environ Eng 1994;120:803-20.
26. Severin BF, Suidan MT, Engelbrecht RS. Series-event kinetic model chemical disinfection. J Environ Eng 1984;110:430-9.
27. Smith RS, Purdy WC. The use of chlorine for correction of sludge bulking in the activated sludge process. Sew Wks Journal 1986;8(2):223–30.
28. Spanjers H., Vanrolleghem P., Olsson G. and Dold P. Respirometry in control of the activated sludge process. Wat. Sci. Tech. 1996;34(34), 117-126.
29. Spanjers, H., Vanrolleghem, P., Olsson, G., Dold, P. RESPIROMETRY IN CONTROL OF THE ACTIVATED SLUDGE PROCESS: PRINCIPLES. International Association on Water Quality, London. 1998.

30. Switzenbaum MS, Plante TR, Woodworth BK. Filamentous bulking in Massachusetts: extent of the problem and case studies. Water Sci Tech 1992; 25:265-71.
31. Tabor PS, Neihof RA. Improved method for determination of respiring individual microorganisms in natural waters. Appl Environ Microbiol. 1982;volume 43: pages 1249–55.
32. U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Environmental Monitoring and Supports Lab., U. S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio. January 2001.
33. Van der Waarde J, Krooneman J, Geurkink B van der Werf A, Eikelboom D, Beimfohr C, Snaidr J, Levantesi C, Tandoi V. Molecular monitoring of bulking sludge in industrial wastewater treatment plants. Proceedings of the 3rd IWA International Specialised Conference on Microorganisms in Activated Sludge and Biofilm Processes, 13-15 June, Rome, Italy Session XVIII, 2001. P. 425-433.
34. Wanner J. ACTIVATED SLUDGE BULKING AND FOAMING CONTROL. USA: Technomic Publishing Company Inc., 1994.
35. Zhang GR, Kiene L, Wable O, Chan US, Duguet JP. Modelling of chlorine residual in the water distribution network of Macao. Environ Technol 1992;13:937-46.

## **VII. APENDICE**

1. **Apéndice 1. Concentración de oxígeno disuelto en los siete (7) ensayos de respirometria.**
2. **Apéndice 2. Estimación lineal (ensayo sin cloro)**
3. **Apéndice 3. Estimación lineal (ensayo con 2,75 mg Cloro/l)**
4. **Apéndice 4. Estimación lineal (ensayo con 5,5 mg Cloro/l)**
5. **Apéndice 5. Estimación lineal (ensayo con 8,25 mg Cloro/l)**
6. **Apéndice 6. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg Cloro/l)**
7. **Apéndice 7. Estimación lineal (ensayo con 11 mg Cloro/l)**
8. **Apéndice 8. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg Cloro/l – a 25°C)**
9. **Apéndice 9. Correlaciones bivariadas de los ensayos sin y con cloro**

**Apendice 1: Concentraciones de oxígeno disuelto obtenidos en los siete (7) ensayos de respirometría.**

| Tiempo |       | Concentraciones de oxígeno disuelto en mg/l |                    |                   |                    |                    |                  |                    |
|--------|-------|---|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| (h)    | (min) | a 20°C                                      |                    |                   |                    |                    | a 25°C           |                    |
|        |       | sin cloro                                   | con 2,75 mgCloro/l | con 5,5 mgCloro/l | con 8,25 mgCloro/l | con 10,2 mgCloro/l | con 11 mgCloro/l | con 10,2 mgCloro/l |
| 0.00   | 0     | 8.1   | 8.1                | 8.1               | 8.1                | 8.1                | 8.1              | 8.1                |
| 0.08   | 5     | 8.1   | 8.1                | 8.1               | 8.1                | 8.1                | 8.1              | 8.1                |
| 0.17   | 10    | 8.1   | 8.1                | 8.1               | 8.1                | 8.1                | 8.1              | 8.1                |
| 0.25   | 15    | 8.1   | 8.1                | 8.1               | 8.1                | 8.1                | 8.1              | 8.1                |
| 0.33   | 20    | 8.1   | 8.1                | 8.1               | 8.1                | 8.1                | 8.1              | 8.1                |
| 0.42   | 25    | 7.5   | 7.5                | 7.5               | 7.5                | 7.5                | 7.5              | 7.5                |
| 0.50   | 30    | 7.1   | 7.1                | 7.1               | 7.1                | 7.1                | 7.1              | 7.1                |
| 0.58   | 35    | 6.6   | 6.9                | 6.9               | 6.9                | 6.9                | 6.9              | 6.9                |
| 0.67   | 40    | 6   | 6.5                | 6.8               | 6.8                | 6.9                | 6.9              | 6.9                |
| 0.75   | 45    | 5.3   | 6                  | 6.7               | 6.7                | 6.8                | 6.9              | 6.7                |
| 0.83   | 50    | 4.7   | 5.3                | 6.2               | 6.6                | 6.8                | 6.9              | 6.7                |
| 0.92   | 55    | 4.2   | 5                  | 5.8               | 6.3                | 6.7                | 6.9              | 6.6                |
| 1.00   | 60    | 3.8   | 4.5                | 5.5               | 6.1                | 6.7                | 6.9              | 6.5                |
| 1.08   | 65    | 3.1   | 4.1                | 5.1               | 6                  | 6.6                | 6.9              | 6.4                |
| 1.17   | 70    | 2.8   | 3.7                | 4.9               | 5.8                | 6.6                | 6.9              | 6.4                |
| 1.25   | 75    | 2.4   | 3.3                | 4.7               | 5.7                | 6.5                | 6.9              | 6.4                |
| 1.33   | 80    | 2   | 3                  | 4.5               | 5.4                | 6.5                | 6.9              | 6.3                |
| 1.42   | 85    | 1.7   | 2.6                | 4.1               | 5.2                | 6.4                | 6.9              | 6.2                |
| 1.50   | 90    | 1.3   | 2                  | 3.6               | 5                  | 6.3                | 6.9              | 6.2                |
| 1.58   | 95    | 1   | 1.7                | 3.3               | 4.9                | 6.3                | 6.9              | 6.1                |
| 1.67   | 100   | 0.6   | 1.5                | 3                 | 4.6                | 6.3                | 6.9              | 6                  |
| 1.75   | 105   | 0.2   | 1.3                | 2.5               | 4.5                | 6.3                | 6.9              | 6                  |

Fuente: Elaboración propia.

## Apéndice 2. Estimación lineal (ensayo sin cloro)

### Descripción del modelo

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| Nombre del modelo  |   | MOD_1           |
| Variable dependiente   | 1 | sin_cloro       |
| Ecuación   | 1 | Lineal          |
| Variable independiente   |   | Tiempo          |
| Constante  |   | Incluidos       |
| Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos |   | Sin especificar |

### Resumen del procesamiento de los casos

|                              | N  |
|------------------------------|----|
| Total de casos               | 16 |
| Casos excluidos <sup>a</sup> | 0  |
| Casos pronosticados          | 0  |
| Casos creados nuevos         | 0  |

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del procesamiento de las variables

|                             | Variables                         |               |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------|
|                             | Dependiente                       | Independiente |
|                             | sin_cloro                         | Tiempo        |
| Número de valores positivos | 16                                | 15            |
| Número de ceros             | 0                                 | 1             |
| Número de valores negativos | 0                                 | 0             |
| Número de valores perdidos  | Perdidos definidos por el usuario | 0             |
|                             | Perdidos del sistema              | 0             |

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: sin\_cloro

| Ecuación | Resumen del modelo |         |     |     |      | Estimaciones de los ... |
|----------|--------------------|---------|-----|-----|------|-------------------------|
|          | R cuadrado         | F       | gl1 | gl2 | Sig. | Constante               |
| Lineal   | ,986               | 999,969 | 1   | 14  | ,000 | 6,706                   |

Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

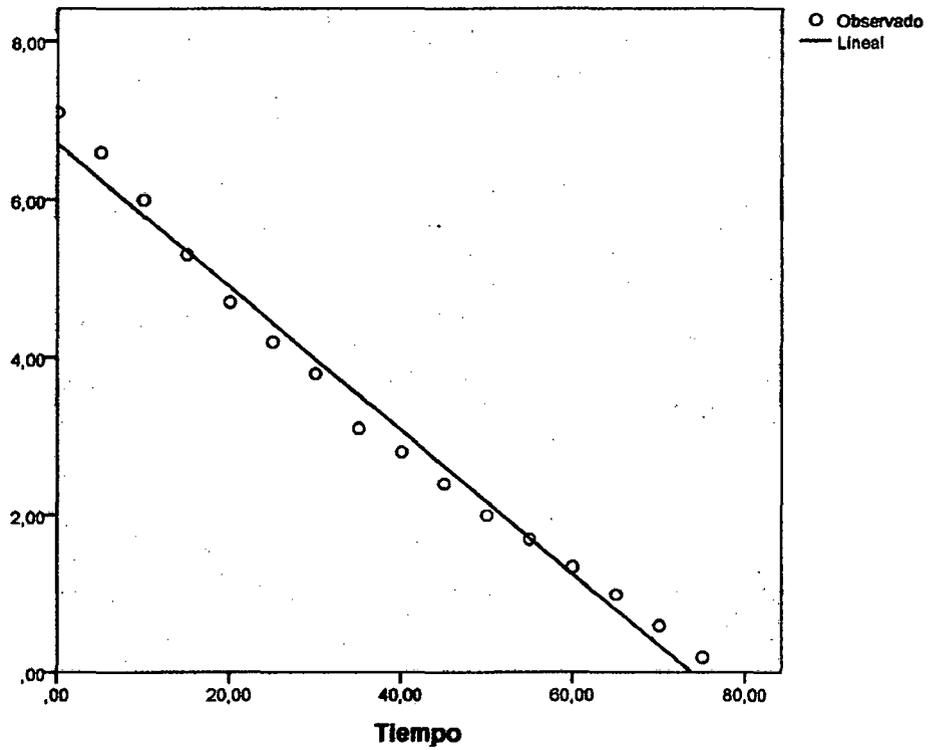
Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: sin\_cloro

|          | Estimaciones de los ... |
|----------|-------------------------|
| Ecuación | b1                      |
| Lineal   | -,091                   |

La variable independiente es Tiempo.

Grafica A-1. Estimación lineal (ensayo sin cloro)



Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

### Apéndice 3. Estimación lineal (ensayo con 2,75 mg Cloro/l)

#### Descripción del modelo

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| Nombre del modelo  |   | MOD_2           |
| Variable dependiente   | 1 | con_2.75_cloro  |
| Ecuación   | 1 | Lineal          |
| Variable independiente   |   | Tiempo          |
| Constante  |   | Incluidos       |
| Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos |   | Sin especificar |

#### Resumen del procesamiento de los casos

|                              | N  |
|------------------------------|----|
| Total de casos               | 16 |
| Casos excluidos <sup>a</sup> | 0  |
| Casos pronosticados          | 0  |
| Casos creados nuevos         | 0  |

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

#### Resumen del procesamiento de las variables

|                                   | Variables      |               |
|-----------------------------------|----------------|---------------|
|                                   | Dependiente    | Independiente |
|                                   | con_2.75_cloro | Tiempo        |
| Número de valores positivos       | 16             | 15            |
| Número de ceros                   | 0              | 1             |
| Número de valores negativos       | 0              | 0             |
| Número de valores perdidos        | 0              | 0             |
| Perdidos definidos por el usuario |                |               |
| Perdidos del sistema              | 0              | 0             |

Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: con\_2.75\_cloro

| Ecuación | Resumen del modelo |          |     |     |      | Estimaciones de los ... |
|----------|--------------------|----------|-----|-----|------|-------------------------|
|          | R cuadrado         | F        | gl1 | gl2 | Sig. | Constante               |
| Lineal   | ,993               | 2068,628 | 1   | 14  | ,000 | 7,111                   |

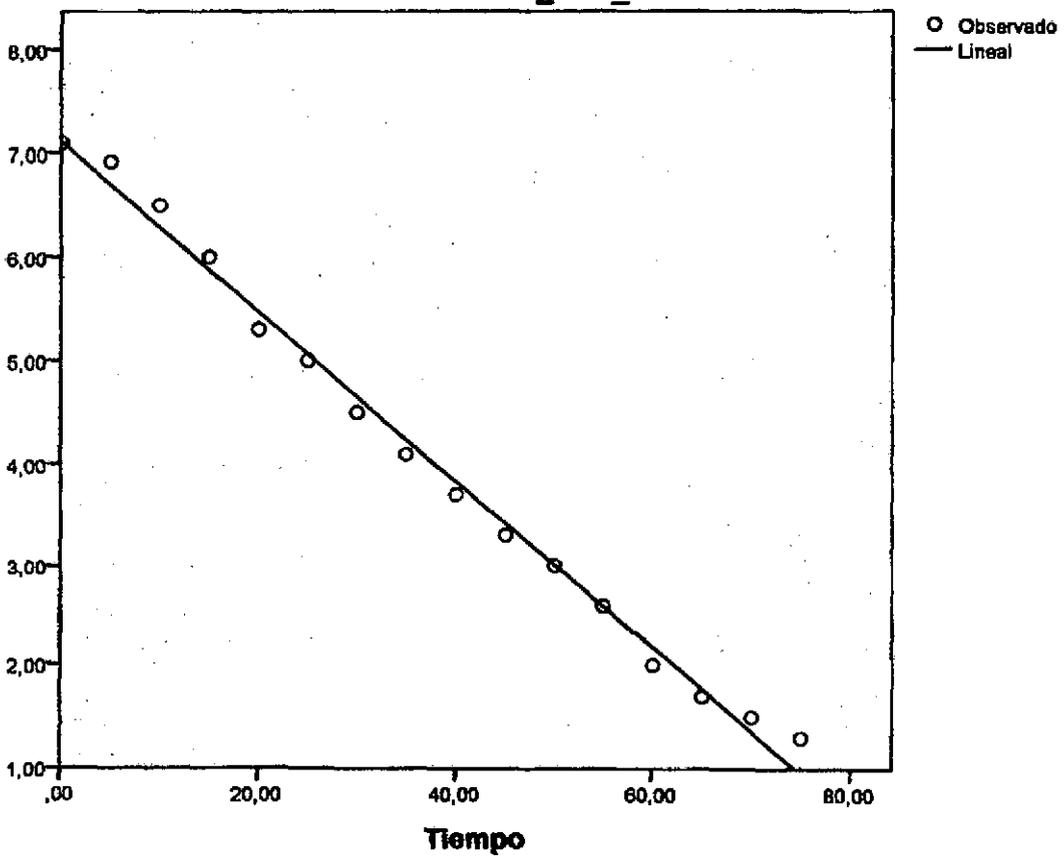
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: con\_2.75\_cloro

| Ecuación | Estimaciones de los ... |
|----------|-------------------------|
|          | b1                      |
| Lineal   | -,082                   |

La variable independiente es Tiempo.

Grafica A-2. Estimación lineal (ensayo con 2,75 mg cloro/l)



Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

## Apéndice 4. Estimación lineal (ensayo con 5,5 mg Cloro/l)

### Descripción del modelo

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| Nombre del modelo  |   | MOD_4           |
| Variable dependiente   | 1 | con_5.5_cloro   |
| Ecuación   | 1 | Lineal          |
| Variable independiente   |   | Tiempo          |
| Constante  |   | Incluidos       |
| Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos |   | Sin especificar |

### Resumen del procesamiento de los casos

|                              | N  |
|------------------------------|----|
| Total de casos               | 16 |
| Casos excluidos <sup>a</sup> | 0  |
| Casos pronosticados          | 0  |
| Casos creados nuevos         | 0  |

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del procesamiento de las variables

|                                   | Variables     |               |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
|                                   | Dependiente   | Independiente |
|                                   | con_5.5_cloro | Tiempo        |
| Número de valores positivos       | 16            | 15            |
| Número de ceros                   | 0             | 1             |
| Número de valores negativos       | 0             | 0             |
| Número de valores perdidos        | 0             | 0             |
| Perdidos definidos por el usuario | 0             | 0             |
| Perdidos del sistema              | 0             | 0             |

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: con\_5.5\_cloro

| Ecuación | Resumen del modelo |          |     |     |      | Estimaciones de los ... |
|----------|--------------------|----------|-----|-----|------|-------------------------|
|          | R cuadrado         | F        | gl1 | gl2 | Sig. | Constante               |
| Lineal   | ,990               | 1442,858 | 1   | 14  | ,000 | 7,365                   |

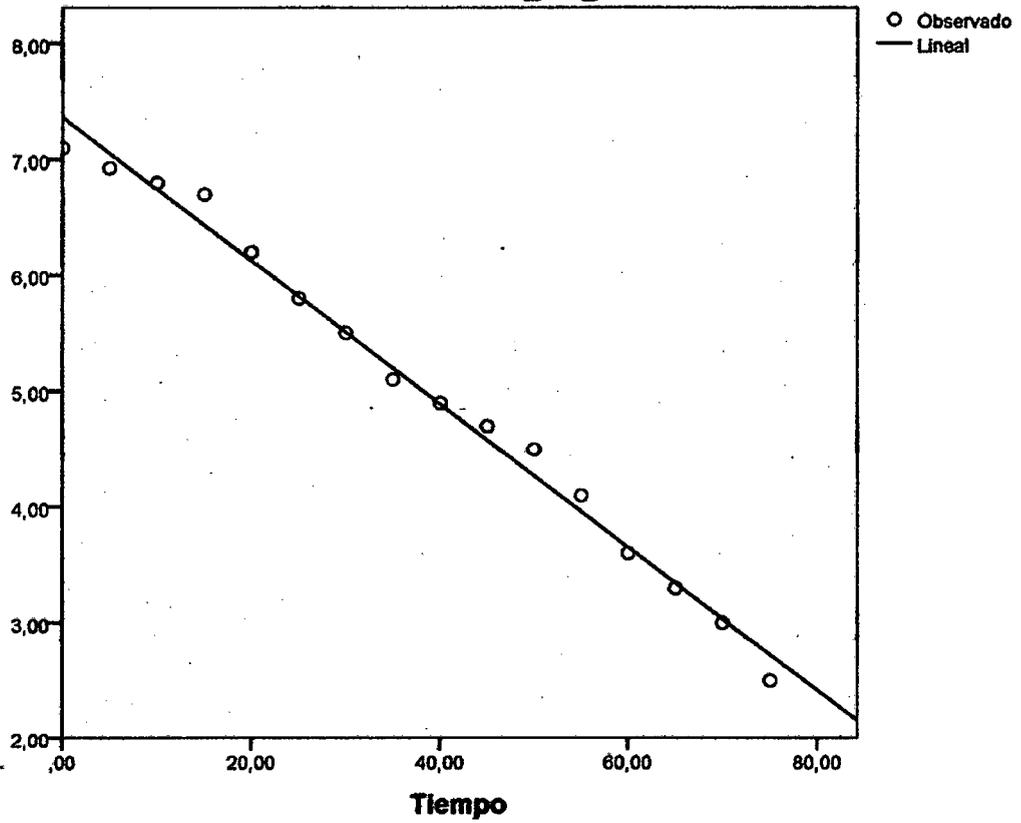
Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

Variable dependiente: con\_5.5\_cloro

|          | Estimaciones de los ... |
|----------|-------------------------|
| Ecuación | b1                      |
| Lineal   | -,062                   |

La variable independiente esTiempo.

Grafica A-3. Estimación lineal (ensayo con 5,5 mg cloro/l)



Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

## Apéndice 5. Estimación lineal (ensayo con 8,25 mg Cloro/l)

### Descripción del modelo

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| Nombre del modelo  |   | MOD_5           |
| Variable dependiente   | 1 | con_8.25_cloro  |
| Ecuación   | 1 | Lineal          |
| Variable independiente   |   | Tiempo          |
| Constante  |   | Incluidos       |
| Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos |   | Sin especificar |

### Resumen del procesamiento de los casos

|                              | N  |
|------------------------------|----|
| Total de casos               | 16 |
| Casos excluidos <sup>a</sup> | 0  |
| Casos pronosticados          | 0  |
| Casos creados nuevos         | 0  |

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del procesamiento de las variables

|                             | Variables                         |               |   |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------|---|
|                             | Dependiente                       | Independiente |   |
|                             | con_8.25_cloro                    | Tiempo        |   |
| Número de valores positivos | 16                                | 15            |   |
| Número de ceros             | 0                                 | 1             |   |
| Número de valores negativos | 0                                 | 0             |   |
| Número de valores perdidos  | Perdidos definidos por el usuario | 0             | 0 |
|                             | Perdidos del sistema              | 0             | 0 |

Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

Variable dependiente: con\_8.25\_cloro

| Ecuación | Resumen del modelo |          |     |     |      | Estimaciones de los ... |
|----------|--------------------|----------|-----|-----|------|-------------------------|
|          | R cuadrado         | F        | gl1 | gl2 | Sig. | Constante               |
| Lineal   | ,995               | 2960,189 | 1   | 14  | ,000 | 7,184                   |

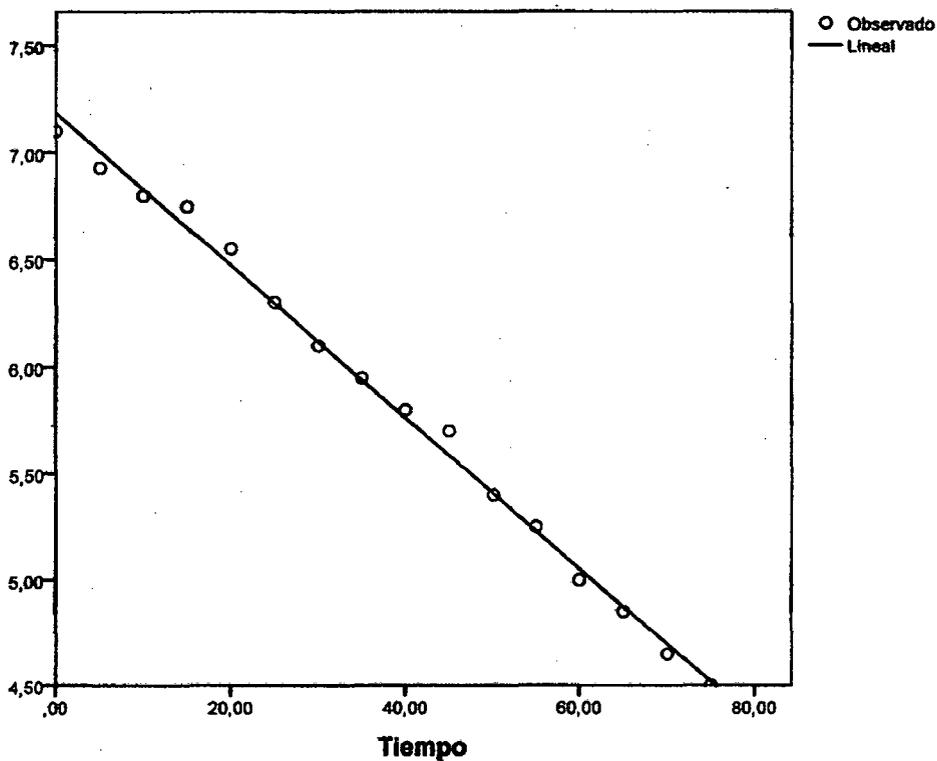
Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: con\_8.25\_cloro

| Ecuación | Estimaciones de los ... |
|----------|-------------------------|
|          | b1                      |
| Lineal   | -,036                   |

La variable independiente es Tiempo.

Grafica A-4. Estimación lineal (ensayo con 8,25 mg cloro/l)



Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

## Apéndice 6. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg Cloro/l)

### Descripción del modelo

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| Nombre del modelo  |   | MOD_9           |
| Variable dependiente   | 1 | con_10.2_cloro  |
| Ecuación   | 1 | Lineal          |
| Variable independiente   |   | Tiempo          |
| Constante  |   | Incluidos       |
| Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos |   | Sin especificar |

### Resumen del procesamiento de los casos

|                              | N  |
|------------------------------|----|
| Total de casos               | 16 |
| Casos excluidos <sup>a</sup> | 0  |
| Casos pronosticados          | 0  |
| Casos creados nuevos         | 0  |

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del procesamiento de las variables

|                             | Variables                         |               |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------|
|                             | Dependiente                       | Independiente |
|                             | con_10.2_cloro                    | Tiempo        |
| Número de valores positivos | 16                                | 15            |
| Número de ceros             | 0                                 | 1             |
| Número de valores negativos | 0                                 | 0             |
| Número de valores perdidos  | 0                                 | 0             |
|                             | Perdidos definidos por el usuario |               |
|                             | Perdidos del sistema              |               |

Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

Variable dependiente: con\_10.2\_cloro

| Ecuación | Resumen del modelo |         |     |     |      | Estimaciones de los ... |
|----------|--------------------|---------|-----|-----|------|-------------------------|
|          | R cuadrado         | F       | gl1 | gl2 | Sig. | Constante               |
| Lineal   | ,979               | 639,673 | 1   | 14  | ,000 | 7,005                   |

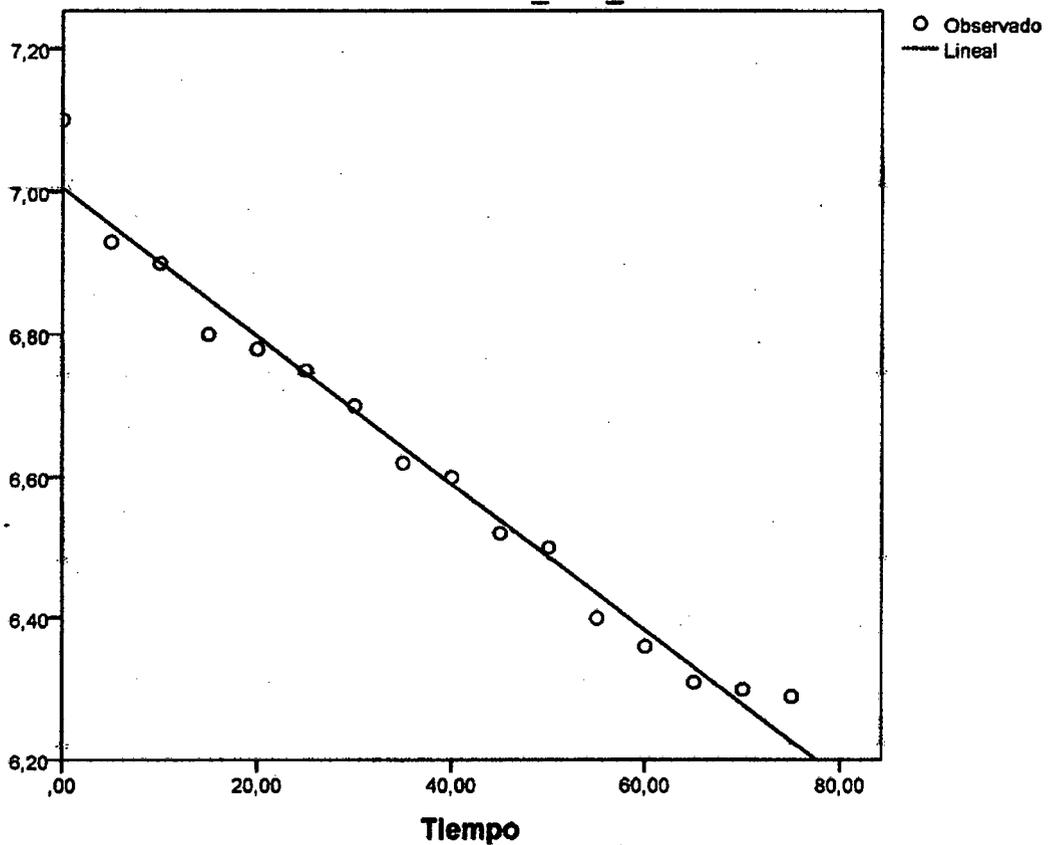
Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: con\_10.2\_cloro

| Ecuación | Estimaciones de los ... |
|----------|-------------------------|
|          | b1                      |
| Lineal   | -,010                   |

La variable independiente es Tiempo.

Gráfica A-5. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg cloro/l)



Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

## Apéndice 7. Estimación lineal (ensayo con 11 mg Cloro/l)

### Descripción del modelo

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| Nombre del modelo  |   | MOD_1           |
| Variable dependiente   | 1 | con_11_cloro    |
| Ecuación   | 1 | Lineal          |
| Variable independiente   |   | Tiempo          |
| Constante  |   | Incluidos       |
| Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos |   | Sin especificar |

### Resumen del procesamiento de los casos

|                              | N  |
|------------------------------|----|
| Total de casos               | 16 |
| Casos excluidos <sup>a</sup> | 0  |
| Casos pronosticados          | 0  |
| Casos creados nuevos         | 0  |

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del procesamiento de las variables

|                                   | Variables    |               |
|-----------------------------------|--------------|---------------|
|                                   | Dependiente  | Independiente |
|                                   | con_11_cloro | Tiempo        |
| Número de valores positivos       | 16           | 15            |
| Número de ceros                   | 0            | 1             |
| Número de valores negativos       | 0            | 0             |
| Número de valores perdidos        |              |               |
| Perdidos definidos por el usuario | 0            | 0             |
| Perdidos del sistema              | 0            | 0             |

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: con\_11\_cloro

| Ecuación | Resumen del modelo |       |     |     |      | Estimaciones de los ... |
|----------|--------------------|-------|-----|-----|------|-------------------------|
|          | R cuadrado         | F     | gl1 | gl2 | Sig. | Constante               |
| Lineal   | ,176               | 3,000 | 1   | 14  | ,105 | 6,969                   |

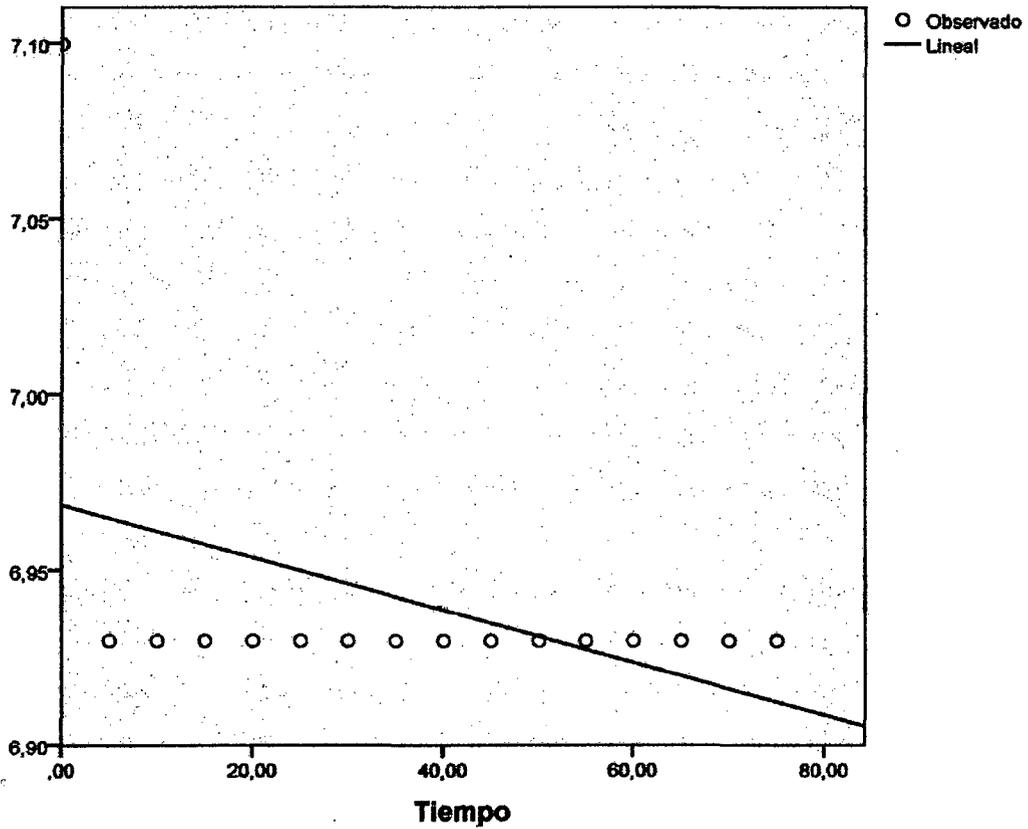
Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

Variable dependiente: con\_11\_cloro

|          | Estimaciones de los ... |
|----------|-------------------------|
| Ecuación | b1                      |
| Lineal   | -,001                   |

La variable independiente esTiempo.

Grafica A-6. Estimación lineal (ensayo con 11 mg cloro/l



Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

## Apéndice 8. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg Cloro/l – a 25°C)

### Descripción del modelo

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| Nombre del modelo  |   | MOD_10          |
| Variable dependiente   | 1 | con_10.2_cloroT |
| Ecuación   | 1 | Lineal          |
| Variable independiente   |   | Tiempo          |
| Constante  |   | Incluidos       |
| Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos |   | Sin especificar |

### Resumen del procesamiento de los casos

|                              | N  |
|------------------------------|----|
| Total de casos               | 16 |
| Casos excluidos <sup>a</sup> | 0  |
| Casos pronosticados          | 0  |
| Casos creados nuevos         | 0  |

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del procesamiento de las variables

|                                   | Variables       |               |
|-----------------------------------|-----------------|---------------|
|                                   | Dependiente     | Independiente |
|                                   | con_10.2_cloroT | Tiempo        |
| Número de valores positivos       | 16              | 15            |
| Número de ceros                   | 0               | 1             |
| Número de valores negativos       | 0               | 0             |
| Número de valores perdidos        | 0               | 0             |
| Perdidos definidos por el usuario | 0               | 0             |
| Perdidos del sistema              | 0               | 0             |

*Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS*

Variable dependiente: con\_10.2\_cloroT

| Ecuación | Resumen del modelo |         |     |     |      | Estimaciones de los ... |
|----------|--------------------|---------|-----|-----|------|-------------------------|
|          | R cuadrado         | F       | gl1 | gl2 | Sig. | Constante               |
| Lineal   | ,976               | 577,072 | 1   | 14  | ,000 | 6,988                   |

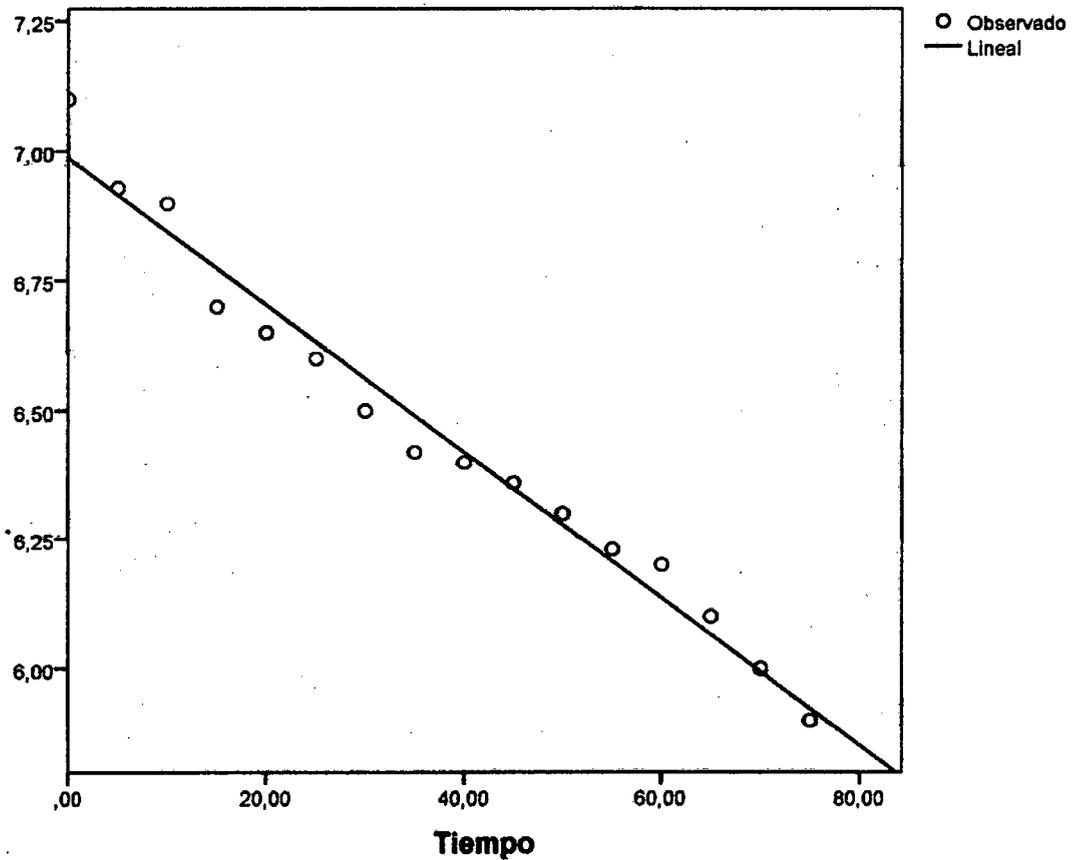
Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: con\_10.2\_cloroT

| Ecuación | Estimaciones de los ... |
|----------|-------------------------|
|          | b1                      |
| Lineal   | -,014                   |

La variable independiente es Tiempo.

Grafica A-7. Estimación lineal (ensayo con 10,2 mg cloro/l a 25°C)



Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

**Apéndice 9. Tabla de correlaciones bivariadas de los  
ensayos sin y con cloro**

**Correlaciones**

|                 |                        | Tiempo  | sin_cloro | con_2.75_cloro | con_5.5_cloro |
|-----------------|------------------------|---------|-----------|----------------|---------------|
| Tiempo          | Correlación de Pearson | 1       | -,993**   | -,997**        | -,995**       |
|                 | Sig. (bilateral)       |         | ,000      | ,000           | ,000          |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |
| sin_cloro       | Correlación de Pearson | -,993** | 1         | ,996**         | ,983**        |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000    |           | ,000           | ,000          |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |
| con_2.75_cloro  | Correlación de Pearson | -,997** | ,996**    | 1              | ,990**        |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000    | ,000      |                | ,000          |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |
| con_5.5_cloro   | Correlación de Pearson | -,995** | ,983**    | ,990**         | 1             |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000    | ,000      | ,000           |               |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |
| con_8.25_cloro  | Correlación de Pearson | -,998** | ,985**    | ,993**         | ,997**        |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000    | ,000      | ,000           | ,000          |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |
| con_10.2_cloro  | Correlación de Pearson | -,989** | ,990**    | ,989**         | ,975**        |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000    | ,000      | ,000           | ,000          |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |
| con_11_cloro    | Correlación de Pearson | -,420   | ,465      | ,417           | ,370          |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,105    | ,069      | ,108           | ,158          |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |
| con_10.2_cloroT | Correlación de Pearson | -,988** | ,993**    | ,986**         | ,979**        |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000    | ,000      | ,000           | ,000          |
|                 | N                      | 16      | 16        | 16             | 16            |

Continua ...

Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS

## Tabla de correlaciones bivariadas de los ensayos sin y con cloro (continuación)

**Correlaciones**

|                 |                        | con_8.<br>25_cloro | con_10.<br>2_cloro | con_11_cloro | con_10.<br>2_cloroT |
|-----------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------|---------------------|
| Tiempo          | Correlación de Pearson | -,998**            | -,989**            | -,420        | -,988**             |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000               | ,000               | ,105         | ,000                |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |
| sin_cloro       | Correlación de Pearson | ,985**             | ,990**             | ,465         | ,993**              |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000               | ,000               | ,069         | ,000                |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |
| con_2.75_cloro  | Correlación de Pearson | ,993**             | ,989**             | ,417         | ,986**              |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000               | ,000               | ,108         | ,000                |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |
| con_5.5_cloro   | Correlación de Pearson | ,997**             | ,975**             | ,370         | ,979**              |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000               | ,000               | ,158         | ,000                |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |
| con_8.25_cloro  | Correlación de Pearson | 1                  | ,982**             | ,393         | ,980**              |
|                 | Sig. (bilateral)       |                    | ,000               | ,133         | ,000                |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |
| con_10.2_cloro  | Correlación de Pearson | ,982**             | 1                  | ,517*        | ,986**              |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000               |                    | ,040         | ,000                |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |
| con_11_cloro    | Correlación de Pearson | ,393               | ,517*              | 1            | ,502*               |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,133               | ,040               |              | ,047                |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |
| con_10.2_cloroT | Correlación de Pearson | ,980**             | ,986**             | ,502*        | 1                   |
|                 | Sig. (bilateral)       | ,000               | ,000               | ,047         |                     |
|                 | N                      | 16                 | 16                 | 16           | 16                  |

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

*Fuente: Elaboración propia – Análisis Programa SPSS*

## **VIII. ANEXOS**

**Anexo 1. Correlaciones de Pearson de los ensayos desarrollados sin y con dosis de cloro.**

**Anexo 2. Microorganismos reconocidos como Filamentosos que causan el Bulking o Espumas en el Fango Activado.**

**Anexo 3. Causas del crecimiento de Microorganismos filamentosos en el Fango Activado.**

**Anexo 4. Descripción y causas de espumas en fango activado.**

**Anexo 5. Foto medidor de oxígeno disuelto portátil**

**ANEXO 1: Correlaciones de Pearson de los ensayos desarrollados sin y con dosis de cloro**

| Correlaciones  |                        | Tiempo | a 20oC    |                |               |                |                | a 25oC       |                |
|----------------|------------------------|--------|-----------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------------|----------------|
|                |                        |        | sin_cloro | con_2.75_cloro | con_5.5_cloro | con_8.25_cloro | con_10.2_cloro | con_11_cloro | con_10.2_cloro |
| Tiempo         | Correlación de Pearson | 1      | -.993**   | -.997**        | -.995**       | -.998**        | -.999**        | -.420        | -.988**        |
|                | Sig. (bilateral)       |        | .000      | .000           | .000          | .000           | .000           | .105         | .000           |
|                | N                      |        | 16        | 16             | 16            | 16             | 16             | 16           | 16             |
| sin_cloro      | Correlación de Pearson |        | 1         | .998**         | .983**        | .985**         | .990**         | .485         | .993**         |
|                | Sig. (bilateral)       |        |           | .000           | .000          | .000           | .000           | .089         | .000           |
|                | N                      |        |           | 16             | 16            | 16             | 16             | 16           | 16             |
| con_2.75_cloro | Correlación de Pearson |        |           | 1              | .990**        | .993**         | .989**         | .417         | .986**         |
|                | Sig. (bilateral)       |        |           |                | .000          | .000           | .000           | .108         | .000           |
|                | N                      |        |           |                | 16            | 16             | 16             | 16           | 16             |
| con_5.5_cloro  | Correlación de Pearson |        |           |                | 1             | .997**         | .975**         | .370         | .979**         |
|                | Sig. (bilateral)       |        |           |                |               | .000           | .000           | .158         | .000           |
|                | N                      |        |           |                |               | 16             | 16             | 16           | 16             |
| con_8.25_cloro | Correlación de Pearson |        |           |                |               | 1              | .982**         | .393         | .980**         |
|                | Sig. (bilateral)       |        |           |                |               |                | .000           | .133         | .000           |
|                | N                      |        |           |                |               |                | 16             | 16           | 16             |
| con_10.2_cloro | Correlación de Pearson |        |           |                |               |                | 1              | .517         | .988**         |
|                | Sig. (bilateral)       |        |           |                |               |                |                | .040         | .000           |
|                | N                      |        |           |                |               |                |                | 16           | 16             |
| con_11_cloro   | Correlación de Pearson |        |           |                |               |                |                | 1            | .502           |
|                | Sig. (bilateral)       |        |           |                |               |                |                |              | .047           |
|                | N                      |        |           |                |               |                |                |              | 16             |
| con_10.2_cloro | Correlación de Pearson |        |           |                |               |                |                |              | 1              |
|                | Sig. (bilateral)       |        |           |                |               |                |                |              |                |
|                | N                      |        |           |                |               |                |                |              |                |

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia - Analisis con programa SPSS.

**Anexo 2. Microorganismos reconocidos como Filamentosos  
que causan el Bulking o Espumas en el Fango  
Activado.**

*Sphaerotilus natans*

type 1701

*Haliscomenobacter hydrossis*

type 021N

*Thiothrix* I and II

*Beggiatoa* spp.

type 0914

type 0041

type 0675

type 1851

type 0803

*Microthrix parvicella*\*

*Nocardia* spp. \*\*

*Nostocoida limicola* I, II & III

type 0961

type 0581

type 0092

type 0411

type 1863\*\*

fungi

actinomycetes

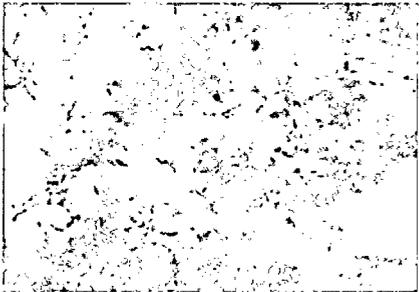
---

\* this filament causes both bulking and foaming.

\*\* these filaments cause foaming only.

Fuente: Michael R. 2003.

## Anexo 3. Causas del crecimiento de Microorganismos filamentosos en el Fango Activado.

| <u>Cause</u>                             | <u>Filaments</u>   |  |
|--|--|--|
| 1. Low Dissolved Oxygen<br>Concentration | <i>Sphaerotilus natans</i><br>type 1701<br><i>Haliscomenobacter hydrossis</i>  |  <p style="text-align: center;">S. natans (1000X)</p>     |
| 2. Low F/M                               | type 0041<br>type 0675<br>type 1851<br>type 0803   |  |
| 3. Septicity                             | type 021N<br><i>Thiothrix</i> I and II<br><i>Nostocoida limicola</i> I,II,III<br>type 0914<br>type 0411<br>type 0961<br>type 0581<br>type 0092 |  |
| 4. Grease and Oil                        | <i>Nocardia</i> spp.<br><i>Microthrix parvicella</i><br>type 1863  |  <p style="text-align: center;">Nocardia Foam (200X)</p> |
| 5. Nutrient Deficiency                   |  |  |
| Nitrogen:                                | type 021N<br><i>Thiothrix</i> I and II   |  |
| Phosphorus:                              | <i>Nostocoida limicola</i> III<br><i>Haliscomenobacter hydrossis</i><br><i>Sphaerotilus natans</i>   |  |
| 6. Low pH                                | fungi  |  |

-----

Note that *H. hydrossis* was previously listed as a low F/M filament. This filament is caused by low DO, but grows relatively slowly and only occurs at lower F/M and a longer sludge age. Lower F/M is not its cause, only where it occurs.

Fuente: Michael R. 2003.

#### Anexo 4. Descripción y causas de espumas en fango activados.

| Foam Description  | Cause(s)   |
|---|--|
| thin, white to grey foam                                      | low cell residence time or "young" sludge (startup foam)                                 |
| white, frothy, billowing foam                                 | once common due to nonbiodegradable detergents (now uncommon)                            |
| pumice-like, grey foam (ashing)                               | excessive fines recycle from other processes (e.g. anaerobic digesters)                  |
| thick sludge blanket on the final clarifier(s)                | denitrification  |
| thick, pasty or slimy, greyish foam (industrial systems only) | nutrient-deficient foam; foam consists of polysaccharide material released from the floc |
| thick, brown, stable foam enriched in filaments               | filament-induced foaming, caused by <i>Nocardia</i> , <i>Microthrix</i> or type 1863     |

Fuente: Michael R. 2003.

**Anexo 5. Foto medidor de oxígeno disuelto portátil**



Fuente: Autoría propia. Medidor de oxígeno disuelto utilizado de la marca  
**EXTECH INSTRUMENTS.**