

**ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DE LOS EFECTOS DE LA FORMA  
DE ALIMENTACIÓN Y DE LA CANTIDAD DE INÓCULO SOBRE EL  
HINCHAMIENTO DE LOS LODOS DE REACTORES AEROBIOS MEZCLA  
COMPLETA EN ETAPA DE ARRANQUE**

**Liz Arango Muñoz**

**Juan David López Hincapié**

**Universidad de Medellín**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería Ambiental**

**Medellín**

**2011**

***ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DE LOS EFECTOS DE LA FORMA  
DE ALIMENTACIÓN Y DE LA CANTIDAD DE INÓCULO SOBRE EL  
HINCHAMIENTO DE LOS LODOS DE REACTORES AEROBIOS MEZCLA  
COMPLETA EN ETAPA DE ARRANQUE***

**Liz Arango Muñoz y Juan David López Hincapié**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros Ambientales**

**Asesor (es):**

**Juan David Correa Estrada**

**Carlos Alberto Sierra Ramírez**

**Universidad de Medellín**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería Ambiental**

**Medellín**

**2011**

*“Dedicado con mucho cariño a mis padres, Juan Guillermo y Ana Cecilia,*

*A los profesores de los que tanto aprendí,*

*A la familia Forbes por haberme ayudado a crecer tanto,*

*Y a Juan por su gran persistencia, inteligencia y amor a la investigación, no pude haber tenido una mejor compañía para este trabajo, gracias.”*

*Liz Arango Muñoz*

*“Dedicado a mi familia, por la paciencia y el apoyo. Porque siempre estuvieron ahí. También al laboratorio de Procesos Biológicos, que fue nuestra cuna de aprendizajes durante tantos meses. A Liz por su compañía desde el principio.”*

*Juan David López Hincapié*

## AGRADECIMIENTOS

Desde el momento en que comenzamos a pensar en la escritura de los agradecimientos, ambos temíamos que alguna persona clave en nuestro trabajo se quedara sin mención, por esa razón desde el principio queremos disculparnos, en caso de que esto suceda.

Queremos agradecer, antes que nada a **Dios**, por iluminar nuestras mentes, guiarnos en la realización del trabajo y por ayudarnos a mantener la calma en los momentos de dificultad que se nos presentaron a lo largo de su elaboración.

Agradecer enormemente a nuestras **familias**, porque a pesar de no estar presentes físicamente Juan Manuel y Luz Gloria desde México nos apoyaron incondicionalmente en todo el proceso. De igual manera, Juan Guillermo y Ana Cecilia fueron personas clave, brindándonos siempre fuerza y ánimos. A nuestros hermanos Andrés López; Juliana y Melisa Arango, quienes de manera desinteresada nos brindaron su ayuda.

De manera más sincera nuestro agradecimiento al Decano de Ingenierías, el maestro Carlos Eduardo López Bermeo, a quien debemos la realización del pregrado en Ingeniería Ambiental. A nuestros asesores de tesis, Juan David Correa y a Carlos Alberto Sierra. A Juan Guillermo Uribe y Sofía Cuartas por ser nuestra luz de esperanza en el Laboratorio. A Francisco Molina por recibirnos con tanta amabilidad. A Juan Manuel López por los consejos desde la distancia y Juan Fernando Gómez por todo su apoyo. Al foro de ayudas de *water & wastewater*, a Rohan, a *Environmental Leverage*, y al Dr. Young en Estados Unidos. A Walter Di Marzio en Argentina y Emilio Serrano en España. A todos, muchísimas gracias.



## CONTENIDO

	<b>Página</b>
INTRODUCCIÓN .....	26
CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN, FORMULACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	30
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	30
2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	31
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	31
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	31
3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	33
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	35
1. ANTECEDENTES.....	35
1.1 BULKING FILAMENTOSO .....	35

1.2 APROXIMACIONES AL CONTROL DEL BULKING FILAMENTOSO .....	37
1.2.1 Métodos físico-químicos.....	37
1.2.2 Métodos selectivos para el control del Bulking filamentoso .....	38
2. MARCO TEÓRICO .....	41
2.1 LODOS ACTIVADOS .....	41
2.2 INÓCULO .....	41
2.3 AGUA RESIDUAL SINTÉTICA.....	42
2.4 CONDICIONES ÓPTIMAS .....	42
2.5 BULKING FILAMENTOSO .....	44
2.6 CASOS DE BULKING FILAMENTOSO EN REACTORES AEROBIOS MEZCLA COMPLETA A ESCALA DE LABORATORIO .....	44
2.6.1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.....	44
2.6.2 Universidad de Delaware, Estados Unidos. ....	45
2.6.3 Universidad de Antioquia, Colombia. ....	46
2.6.4 Universidad de Medellín, Colombia .....	47

2.7 ALIMENTACIÓN CONTINUA .....	48
2.8 ALIMENTACIÓN INTERMITENTE .....	49
2.9 ALIMENTACIÓN CONTINUA VS ALIMENTACIÓN INTERMITENTE .....	49
2.10 IVL Y LAS OBSERVACIONES AL MICROSCOPIO .....	56
CAPÍTULO III: EXPLICACIÓN METODOLÓGICA .....	58
1. ÁREA DE ESTUDIO .....	58
2. MATERIALES Y EQUIPOS .....	59
2.1 MATERIALES Y REACTIVOS .....	59
2.2 EQUIPOS .....	60
3. OBTENCIÓN DE BIOMASA PARA LOS EXPERIMENTOS .....	66
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA PRIMERA FASE .....	69
4.1 DIAGRAMA DE EXPERIMENTACIÓN (PRIMERA FASE) .....	70
4.2 CRONOGRAMA PRIMERA FASE .....	71
4.3 PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LOS REACTORES EN LA PRIMERA FASE .....	71

4.4 PROTOCOLO DE ACCIÓN PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA PRIMERA FASE .....	72
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA SEGUNDA FASE .....	72
5.1 DIAGRAMA DE EXPERIMENTACIÓN (SEGUNDA FASE).....	76
5.2. CRONOGRAMA SEGUNDA FASE .....	76
5.3. PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LOS REACTORES EN LA SEGUNDA FASE .....	77
5.4. PROTOCOLO DE ACCIÓN PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA SEGUNDA FASE .....	77
6. CRONOGRAMA GENERAL DE ACTIVIDADES .....	78
7. PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	79
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	82
1. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS .	82
1.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PRIMERA FASE .....	82
1.1.1 Variables independientes. ....	82
1.1.2 Variables dependientes. ....	83

1.1.3 Variables fijas.....	90
1.1.4 Variables cualitativas.....	95
1.2 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SEGUNDA FASE.....	98
1.2.1 Variables independientes.....	98
1.2.2 Variables dependientes.....	99
1.2.3 Variables fijas.....	106
1.1.4 Variables cualitativas.....	110
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	115
1. CONCLUSIONES.....	115
2. RECOMENDACIONES.....	116
BIBLIOGRAFÍA.....	119

## LISTA DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1 Medidas básicas para el monitoreo de reactores biológicos aerobios .....	43
Tabla 2 Sustrato empleado por ENVITREAT .....	67
Tabla 3 Sustrato modificado de ENVITREAT .....	67
Tabla 4 Resultados de laboratorio para el ARS empleada en los ensayos .....	68
Tabla 5 Cronograma primera fase .....	71
Tabla 6 Parámetros de diseño y operación reactores Fase 1.....	72
Tabla 7 Cronograma segunda fase .....	76
Tabla 8 Parámetros de diseño y operación reactores Fase 2.....	77
Tabla 9 Cronograma general de actividades .....	78
Tabla 10 Presupuesto del proyecto .....	79
Tabla 11 Abreviaciones para los reactores de la primera fase .....	82
Tabla 12 Abreviaciones para los reactores de la segunda fase.....	98

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1 Esquema de un reactor aerobio a escala de laboratorio .....	27
Figura 2 Reactor aerobio mezcla completa. ....	28
Figura 3 Tasa de crecimiento específico para microorganismos filamentosos y formadores de floc a diferentes concentraciones de sustrato .....	39
Figura 4 Diflugia sp, con filamentos y floc.....	45
Figura 5 Montaje experimental realizado en la Universidad de Delaware para la determinación de la tratabilidad del acetato de sodio .....	46
Figura 6 Reactor aerobio mezcla completa en flujo continuo alimentado con licor adulterado.....	47
Figura 7 Reactor deteriorado. Nótese como la sección de reacción y sedimentación lucen prácticamente iguales. Parte del lodo se ha perdido por lavado, y el resto permanece en el fondo del sistema por una mala mezcla .....	48
Figura 8 Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa .....	50
Figura 9 Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa. Operados con 1000 mg/L de SST .....	51
Figura 10 Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa. Operados con 2000 mg/L de SST .....	52

Figura 11 Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa. Operados con 4000 mg/L de SST .....	53
Figura 12 Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con aguas residuales de cervecería. Operados con 2000 mg/L de SST. ....	54
Figura 13 Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con aguas residuales de una industria petro-química. Operados con 4000 mg/L de SST .....	55
Figura 14 Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con aguas residuales de una industria láctea. Operados con 4000 mg/L de SST .....	55
Figura 15 Laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Medellín .....	58
Figura 16 Recipiente de acrílico (Reactor).....	61
Figura 17 Sistema de filtración de tres puestos .....	61
Figura 18 Estufa GCA.....	62
Figura 19 Mufla para incineración de los sólidos .....	62
Figura 20 Microscopio Olympus CH30 usado para las observaciones de la biomasa .....	63
Figura 21 Bomba aireadora de pecera marca Atman At-A6500 .....	63
Figura 22 Oxímetro <i>Handylab</i> OX1 de Schott para medición de OD .....	64
Figura 23 pH-metro WTW pH320 para seguimiento del pH del reactor.....	64
Figura 24 Bomba peristáltica <i>Pump drive</i> PD5106 de Heidolph .....	65
Figura 25 Bomba de pecera de flujo continuo sumergible Dolphin 300 .....	65
Figura 26 Temporizador Z TIMER modelo PET-902A.....	66
Figura 27 Creación del inóculo a partir del ARS para los ensayos realizados .....	68



Figura 28 Inóculo obtenido a partir del ARS, foto del 11 de junio de 2010 .....	69
Figura 29 Montaje de reactores en paralelo de la primera fase. R2 a la izquierda y R1 a la derecha .....	70
Figura 30 Diagrama de experimentación de la primera fase .....	71
Figura 31 Protocolo de la primera fase .....	72
Figura 32 Biomasa al microscopio del inóculo empleado para arrancar el reactor con 2000 mg/L de SST de la segunda fase .....	73
Figura 33 Reactor 2K el 13 de julio de 2010 .....	74
Figura 34 Reactor 1K el 20 de julio de 2010 .....	75
Figura 35 Reactor 4K el 29 de julio de 2010 .....	75
Figura 36 Diagrama de experimentación de la segunda fase .....	76
Figura 37 Protocolo de la segunda fase .....	77
Figura 38 Oxígeno Disuelto de los reactores R1 y R2 .....	83
Figura 39 Sedimentabilidad de los reactores R1 y R2 .....	84
Figura 40 Sólidos Suspendidos Totales de los reactores R1 y R2 .....	85
Figura 41 Índice volumétrico de lodos del reactor R1 .....	86
Figura 42 Índice volumétrico de lodos del reactor R2 .....	87
Figura 43 Índice volumétrico de lodos de los reactores R1 y R2 .....	87
Figura 44 Relación F/M de los reactores R1 y R2 .....	89
Figura 45 Edad de lodos de los reactores R1 y R2 .....	90
Figura 46 pH de los reactores R1 y R2 .....	91
Figura 47 Caudal de los reactores R1 y R2 .....	92

Figura 48 Caudales de los reactores R1 y R2 .....	92
Figura 49 Tiempo de retención hidráulico reactores 1 y 2 .....	93
Figura 50 Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente con la bomba peristáltica .....	94
Figura 51 Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente con la bomba de pecera adherida al temporizador.....	94
Figura 52 Seguimiento fotográfico al reactor 1 .....	96
Figura 53 Seguimiento fotográfico al reactor 2 .....	97
Figura 54 Oxígeno disuelto reactores R2K, R1K y R4K .....	98
Figura 55 SST de los reactores R2K, R1K y R4K.....	99
Figura 56 Sedimentabilidad de los reactores R2K, R1K y R4K. ....	100
Figura 57 IVL del R2K.....	102
Figura 58 IVL del R1K.....	102
Figura 59 IVL del R4K.....	103
Figura 60 IVL de los reactores R2K, R1K y R4K .....	103
Figura 61 F/M reactores R2K, R1K y R4K.....	104
Figura 62 Edad de lodos de los reactores R2K, R1K y R4K.....	105
Figura 63 pH de los reactores R2K, R1K y R4K .....	106
Figura 64 Caudales de los reactores R2K, R1K y R4K.....	107
Figura 65 Tiempos de retención hidráulico de los reactores R2K, R1K y R4K ....	107
Figura 66 Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente para el R2K.....	108

Figura 67 Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente para el R1K.....	109
Figura 68 Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente para el R4K.....	109
Figura 69 Seguimiento fotográfico al R2K .....	111
Figura 70 Seguimiento fotográfico R1K .....	112
Figura 71 Seguimiento fotográfico R4K .....	113
Figura 72 Reactor1 y 2 en el día 8 del experimento .....	125
Figura 73 Reactor1 y 2 en el día 14 del experimento .....	126
Figura 74 Reactor 2K en el día 4 y 8 del experimento .....	127
Figura 75 Reactor 1K en el día 3 y 6 del experimento .....	128
Figura 76 Reactor 4K en el día 2 y 8 del experimento .....	129

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Página</b>
ANEXOS.....	125
Anexo 1. Fotos relevantes al microscopio para la primera fase. ....	125
Anexo 2. Fotos relevantes al microscopio para la segunda fase.....	127

## GLOSARIO

**AFLUENTE:** agua residual que ingresa o entra al sistema de tratamiento.

**AGUA RESIDUAL SINTÉTICA:** preparación de solución acuosa que simula las características físico-químicas de un agua residual real.

**BULKING FILAMENTOSO:** hinchamiento de los lodos debido al crecimiento excesivo de microorganismos filamentosos.

**BULKING NO FILAMENTOSO:** hinchamiento de los lodos debido a microorganismos no filamentosos (ejemplo: zooglea).

**DBO:** Demanda Bioquímica de Oxígeno. Es un parámetro que estima la cantidad de oxígeno que se requiere para que una población de microorganismos en un tiempo dado y a una temperatura dada oxide la materia orgánica biodegradable en una muestra de agua.

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno. Es un parámetro que estima la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica o inorgánica presente en una muestra de agua mediante un oxidante fuerte.

**EFLUENTE:** agua residual que resulta y/o sale del sistema de tratamiento.

**ESPONJAMIENTO DE LODOS:** abultamiento o hinchamiento de lodos, provocando una mala sedimentabilidad y problemas en su separación del agua residual tratada.

**FLOC:** conjunto de sustancias orgánicas e inorgánicas que van aglomerándose gracias a la acción de las bacterias presentes en el reactor, y que por su diferencia de densidad con el agua, y su incremento en peso, tiende a sedimentar.

**FLUJO CONTINUO:** alimentación permanente de agua residual afluyente al sistema de tratamiento.

**FLUJO INTERMITENTE:** alimentación por pulsos, o por tandas, de agua residual afluyente al sistema de tratamiento.

**F/M:** relación Alimento/Microorganismos; por sus siglas en inglés Food/Microorganisms. Parámetro de control, así como la edad de lodos, para

muchas plantas de tratamiento de aguas residuales de lodos activados. Establece la proporción que existe entre el alimento (carga de entrada, expresada como el producto entre la DBO (o DQO) y el caudal afluente) y los microorganismos presentes en los lodos (medidos como Sólidos Suspendidos Totales o Volátiles (SST o SSV)). Para lodos activados, algunos autores recomiendan un rango entre 0.25 y 0.5 mgDBO/mgSSV\*d.

**HONGOS FILAMENTOSOS:** microorganismos que crecen en forma de filamentos o cadenas y que se caracterizan por crecer y causar problemas en sistemas de lodos activados con pH bajo.

**ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODOS (IVL):** se define como el volumen (en mililitros) ocupado por 1 gramo de lodo, después de 30 minutos de sedimentación, en una probeta graduada. Para su determinación se requiere dejar reposar el lodo en una probeta durante media hora, y conocer el valor de los sólidos suspendidos del reactor. Es un excelente indicador del grado de sedimentabilidad del lodo. El rango óptimo para una planta de lodos activados puede estar entre 50 y 100 mL/g, aunque a valores mayores y con un sedimentador secundario sobredimensionado podría no experimentarse episodios de lavado de biomasa. También existe el Índice Volumétrico de Lodos Diluido (IVLD), donde la muestra de lodo se diluye con efluente hasta conseguir cierto nivel de sedimentabilidad en la probeta graduada o en el cono imhoff, y se calcula del mismo modo que el IVL pero multiplicado por el factor de dilución.

**INÓCULO:** cantidad de microorganismos obtenidos de algún medio; suele emplearse una muestra del licor mixto de alguna planta de tratamiento de aguas residuales ya en operación, pero también es posible obtenerlos a partir del agua residual.

**LAVADO DE UN REACTOR:** pérdida de biomasa en el efluente, con la consecuente pérdida de eficiencia del reactor. Entre las causas más comunes está: el Bulking filamentoso, el levantamiento del lodo en el sedimentador por burbujas de N<sub>2</sub> gaseoso y caudales pico o tiempos de retención hidráulicos más bajos de los que soporta el sistema en particular.

**LODO ACTIVADO:** también llamado lodo, fango, biomasa, o licor mixto, se refiere al conjunto de microorganismos encargados del tratamiento del agua residual.

**MICROORGANISMOS FILAMENTOSOS:** se refiere a hongos y bacterias caracterizadas por su forma de crecimiento: en forma de cadenas y filamentos. Su

abundancia y crecimiento excesivo suele acarrear problemas por Bulking filamentoso. Son deseables en correctas proporciones, por cuanto dan sustento al floc y son buenos removedores de DBO.

**MICROORGANISMOS FORMADORES DE FLOC:** bacterias que en su crecimiento tienden a aglomerarse. Forman flóculos de buenas características de sedimentabilidad con microorganismos filamentosos en las correctas proporciones.

**NUTRIENTES:** compuestos inorgánicos u orgánicos, minerales o metales en concentraciones trazas. Se pueden dividir en macro (nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), carbono (C) y azufre (S)) y micronutrientes (magnesio (Mg), calcio (Ca), manganeso (Mn), hierro (Fe), entre otros).

**OXÍGENO DISUELTO (OD):** forma disponible de oxígeno para los microorganismos. Su concentración depende de muchos factores, entre ellos la temperatura, la presión atmosférica, el grado de actividad microbiana, la cantidad de microorganismos, la presencia de compuestos que desplacen el oxígeno (dióxido de carbono y compuestos de azufre), grasas, aceites, detergentes, y efectividad en la aireación. El rango óptimo de oxígeno disuelto está entre 1 y 2 mg/L. Por debajo de este rango tiende a favorecerse el crecimiento de microorganismos filamentosos. Por encima del mismo tiende a malgastarse energía en aireación.

**pH:** indica tendencias hacia la acidez o la alcalinidad. El rango óptimo de pH está comprendido entre 7,5 y 8,5 unidades de pH. Valores de pH por debajo de 6,5 pueden favorecer el crecimiento de hongos filamentosos y otros microorganismos favorecedores del bulking. Un pH por encima de 9 unidades de pH puede tener efectos inhibitorios sobre la biomasa.

**REACTOR AEROBIO MEZCLA COMPLETA:** configuración de reactor en donde se trabaja con aire u oxígeno para garantizar condiciones aerobias. Además se debe mezclar de alguna forma el contenido del reactor para que entren en íntimo contacto la biomasa, el agua residual afluente y el aire. Usualmente, desde la parte inferior del reactor se proporciona aire y al ascender éste, crea la mezcla. En el caso de la Universidad de Medellín, Universidad de Antioquia, y otras, el reactor aerobio mezcla completa a escala de laboratorio está unido a la unidad de sedimentación; con esto se ahorra la necesidad de bombear el lodo sedimentado

de vuelta al reactor. Sin embargo, es un diseño que se discute y que se preferiría tener por separado la zona de reacción y sedimentación, para así tener un mayor control sobre el lodo de retorno. A escala real lo común es encontrar ambas unidades, reactor y sedimentador, por separado.

**RÉGIMEN DE FLUJO:** configuración del flujo; sea continuo o intermitente.

**SEDIMENTABILIDAD:** también llamado “volumen de lodo” (VL), es un parámetro que representa el volumen en mililitros ocupado por una muestra de lodo activado luego de dejarse en reposo durante 30 minutos en una probeta de 1 litro. También puede correrse la prueba con un factor de dilución de dos (500 mL de lodo en 500 mL de agua de la llave), y llamarse “sedimentabilidad al 50%”, que resulta útil para diferenciar casos entre hinchamiento o exceso de lodos. Cuando se trata de exceso de lodo, la sedimentabilidad al 50% muestra un valor muy similar a la mitad de la prueba al 100% (si la prueba al 100% marca 1000 mL/L, en un caso de exceso de lodo la prueba al 50% marcará un valor cercano a 500 mL/L), pero cuando se trata de hinchamiento de lodo, la sedimentabilidad al 50% muestra un valor muy alejado a la mitad de la prueba al 100% (si la prueba al 100% marca 1000 mL/L, en un caso de hinchamiento de lodo la prueba al 50% marcará un valor superior a 500 mL/L).

**SELECTOR:** zona de reacción donde en un muy corto tiempo de retención se somete a la biomasa del reactor (generalmente proveniente del retorno de lodos) al afluente y se crean condiciones de una alta F/M. Teóricamente en esta zona, en abundancia de sustrato, se aprovecha la capacidad de almacenamiento y de crecimiento de los microorganismos floculantes, al pasar posteriormente al reactor, donde la concentración de sustrato es mucho menor y donde los microorganismos filamentosos tienen desventaja metabólica. Para determinar el volumen de diseño se tiene en cuenta el caudal afluente, la  $DBO_5$  afluente, los SSV del selector y la F/M que debe estar entre 30 y 40 g  $DBO_5$  / g SSV\*d. Pueden ser óxicos, anóxicos o anaerobios.

**SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST):** sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos coloidales cuyo tamaño de partícula no pasa el filtro estándar de fibra de vidrio para este parámetro.



**SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV):** sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos coloidales, capaces de volatilizarse por efecto de la calcinación a 550°C en un tiempo de 20 a 30 minutos.

## RESUMEN

El uso de flujo intermitente ha sido propuesto por algunos autores como una solución al problema del bulking filamentoso o hinchamiento de lodos por cuanto trabaja de forma similar a un selector biológico al favorecer el crecimiento de los microorganismos formadores de floc. Ciertamente es, que antes se deben revisar otras variables básicas como el nivel de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, la presencia de tóxicos o grasas y la ausencia de nutrientes, entre otros. El uso de selectores biológicos aparece entonces como una posible solución frente a cierto tipo de microorganismos filamentosos que no se controlan con las variables mencionadas anteriormente.

Los estudios a escala de laboratorio sobre este tema son realmente escasos, por lo que no fue posible tomar alguna base de referencia en el mismo contexto, sino que se formuló una hipótesis con base en la literatura referente a casos en planta, los artículos sobre la aplicación de selectores y las recomendaciones de expertos, donde se afirmaba que en etapa de arranque, los reactores aerobios mezcla completa presentarían una mejor evolución del Índice Volumétrico de Lodos (IVL) en el tiempo con flujo intermitente de alimentación que con un flujo continuo.

Además se planteó una segunda hipótesis, donde se afirmaba que la cantidad inicial de inóculo empleado en el arranque de reactores aerobios mezcla completa tenía relación con el comportamiento del IVL en tiempo, de manera que a mayor cantidad inicial de inóculo, mayor tiempo tardaría un reactor en sufrir lavado de biomasa por efecto del incremento del IVL, y viceversa, a menor cantidad inicial de inóculo, menor tiempo tardaría el reactor en mostrar los efectos del incremento en el IVL.

Se emplearon reactores aerobios de mezcla completa a escala de laboratorio, construidos en acrílico. El experimento se desarrolló en dos fases, ambas en etapa de arranque de la biomasa: una primera para verificar el comportamiento del IVL en el tiempo según el flujo de alimentación, continuo o intermitente, y una segunda en la que se usaron los mismos reactores, para tratar de establecer la relación entre la cantidad de inóculo empleado con el deterioro del IVL en el tiempo, bajo el flujo de alimentación continuo.

Para la primera fase de experimentos se notó una gran diferencia entre los comportamientos del IVL en el tiempo, según el tipo de flujo de alimentación. El IVL del reactor alimentado bajo flujo continuo desmejoró en el tiempo causando una pérdida constante de biomasa por lavado, mientras que el IVL del reactor bajo flujo intermitente se incrementó ligeramente pero mostrando un aumento en la biomasa.

Para la segunda fase no se observó ninguna tendencia al cambio del IVL en el tiempo respecto a la cantidad de inóculo empleado. Sin importar la cantidad de inóculo los valores de IVL se incrementaron mostrando en casi todos los casos la pérdida de biomasa por lavado.

**LABORATORY SCALE STUDY ON THE EFFECTS OF FEEDING PATTERN  
AND AMOUNTS OF INOCULUM ON THE FILAMENTOUS BULKING OF FULL  
MIXED AEROBIC REACTORS IN THE STARTING PHASE**

**ABSTRACT**

The use of an intermittent flow on activated sludge systems has been proposed by some experts as a solution to the filamentous bulking issue because it works as a biological selector favoring the growth of floc forming bacteria. However other basic variables ought to be checked first, such as: dissolved oxygen level, pH, temperature and the presence of toxics and FOG (Fat, Oil and Grease) as well as the lack of nutrients, among others. The use of biological selectors appears as a possible solution for some kinds of filamentous microorganisms that cannot be controlled by the variables mentioned before.

Laboratory scale studies about this subject are quite scarce, that is the reason why it was not possible to have a point of reference within the same context, a hypothesis based on the literature of real cases was formulated. Articles about the application of selectors and experts' recommendations stated that in a starting phase, aerobic full mixed reactors would show a better evolution of the Sludge Volume Index (SVI) on intermittently fed systems than they do on continuously fed systems.

A second hypothesis was formulated, which stated that the amount of inoculum used for the starting of the aerobic full mixed reactors had a relationship with the SVI behavior based on time thus the greater initial quantity of inoculum, the longer the reactor would take to suffer the washout of biomass in the effluent by the increase of the SVI and vice versa, the smaller the amount of inoculum, the less time it would require the reactor to start showing the effects of the increase of SVI.

Acrylic laboratory scale aerobic full mixed reactors were used. The experiment was developed in two phases, both of them in the biomass starting stage: the first one to verify the behavior of the SVI on time according to the feeding pattern, continuous or intermittent, and a second one where the same reactors were used to establish the relationship between the amount of inoculum used and the deterioration of the SVI based on time, under a continuous feeding pattern.

In the second phase, no tendency for the SVI to change based on time according to the amount of inoculum used was observed. Regardless of the amount of inoculum used, the values of SVI increased showing a loss of biomass in almost all cases.

## INTRODUCCIÓN

El bulking filamentoso, es el bien llamado “dolor de cabeza” de los lodos activados. Es una condición problemática muy común en el tratamiento de aguas mediante lodos activados. Obedece mayormente a Aguas Residuales Industriales (ARI) por, entre muchas causas, deficiencia de nutrientes (1). Se trata de aguas residuales muy específicas, donde fácilmente puede haber falta de nitrógeno, fósforo, hierro, DBO, micronutrientes, o alguna combinación entre ellas, dependiendo del tipo de proceso.

Desde mediados del siglo XX se conocía sobre el fenómeno y se lanzaban algunas teorías de los microorganismos implicados. A la fecha se reconocen más de 30 especies responsables del bulking y se sabe además que sus causas son variadas; pH bajo (por debajo de 6,5 unidades de pH), OD bajo (inferior a 1 mg/L), presencia y acumulación de sustancias tóxicas (metales pesados, por ejemplo), altos gradientes de temperatura y deficiencia de macro-nutrientes ( $\text{DBO}_5$ , N, P), y micro-nutrientes, cantidades elevadas de grasas, aceites y de septicidad proveniente de compuestos de azufre (2). Algunos autores argumentan que el único impacto negativo de estos compuestos es que desplazan el oxígeno, luego son las condiciones de bajo OD lo que propicia a las filamentosas (3). Otros autores argumentan que los sulfuros pueden ser aprovechados por las filamentosas para su crecimiento (4).

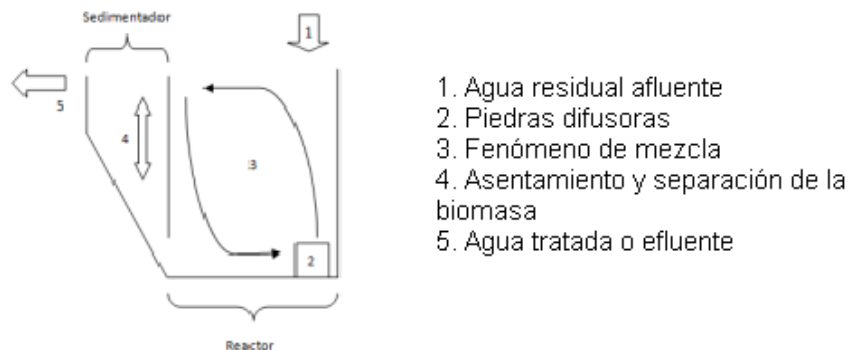
A escala de laboratorio se suelen emplear reactores para simular el proceso real, siendo en la parte de docencia una herramienta de gran utilidad para el aprendizaje de conceptos básicos de procesos bioquímicos para programas como la ingeniería ambiental o sanitaria. Uno de los modelos más desarrollados es el reactor aerobio de mezcla completa, que se muestra en la Figura 1.

Cuando se trabaja con reactores a escala de laboratorio, es recomendable elaborarlos en acrílico, para lograr observar la mezcla, sedimentación y comportamiento del reactor en general. El tamaño podrá variar directamente a la carga orgánica soportada. La literatura muestra algunos parámetros de diseño. Un reactor a escala de laboratorio o a escala real pretenderá entonces que una población microbiana realice la misma función: transformar la materia orgánica en dióxido de carbono y agua. Buena parte de esa materia orgánica sirve a los microorganismos para multiplicarse, por lo que la biomasa es otro subproducto de dichas transformaciones.

Para suplir la necesidad de agua residual fresca, a escala de laboratorio, se emplea entonces un agua residual sintética que contenga los elementos necesarios para el buen desarrollo de la biomasa. Como puede observarse en la Figura 1, el agua residual suministrada o afluente del sistema, puede ingresarse por varios medios, cada uno con diferencias en costo y eficiencia, como la gravedad (de gran interés porque sus costos son extremadamente bajos, pero problemático por la variación de caudal con la altura), bomba de pecera (mucho más económica que una bomba peristáltica o dosificadora, pero necesita de un sistema de control de caudal. Para ello puede emplearse un temporizador), bomba peristáltica o dosificadora (una de las alternativas de mayor costo, pero de una alta durabilidad).

Al ingresar el agua residual al sistema, esta es mezclada completamente (de ahí el nombre del sistema) por el empuje de finas burbujas de aire que serán dispuestas en la pared opuesta al sedimentador. Estas burbujas son generadas, entre otras, con el uso de piedras difusoras, tal como lo representa en la Figura 1 el ítem 2. Hidráulicamente se creará un vaivén de corrientes entre el reactor y el sedimentador, esto anterior para el caso de los reactores a escala de laboratorio, pues en plantas a escala real el sedimentador está por lo general en un tanque diferente al reactor. Los microorganismos toman el oxígeno disuelto que aportan las burbujas de aire, el agua residual y al crecer ganan mayor densidad que el agua y sedimentan. Al permanecer en el reactor están sometidos al fenómeno de mezcla completa con el oxígeno y el agua residual, pero al pasar al sedimentador pueden asentarse y separarse del agua tratada, produciendo así el flujo efluente.

**Figura 1** Esquema de un reactor aerobio a escala de laboratorio



Fuente: Elaboración propia, 2009.

En la Figura 2, se observa una buena separación de la biomasa y el agua tratada. Se trata de un reactor aerobio mezcla completa iniciado por los autores en el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Medellín, en el mes de octubre del 2008. Para diciembre de ese mismo año, la biomasa del reactor

presentaba serios problemas de sedimentación, llegando al extremo de tener episodios donde la biomasa era arrastrada y lavada por completo del sistema\*. Tales situaciones alejaron al reactor de las condiciones de estabilidad o de equilibrio. A partir de allí nació el interés por investigar más al respecto y a buscar una solución.

**Figura 2** Reactor aerobio mezcla completa.



Fuente: Elaboración propia, 2008.

El trabajo de grado propone una variación importante en el la etapa de arranque de los reactores aerobios mezcla completa a escala de laboratorio, en cuanto a la presencia o ausencia de bacterias filamentosas conducentes al fenómeno de bulking, dicha variación se verá afectada tanto por la forma de alimentación como por el uso de inóculo.

---

\* Los autores comprobaron en estudios en el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Medellín, en agosto del 2009, que al disminuir el caudal afluente se solucionaba el problema de arrastre y consecuente pérdida de biomasa al aumentar el TRH.





## CAPÍTULO I

# PRESENTACIÓN, FORMULACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

# **CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN, FORMULACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

## **1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Existe una dificultad en separar satisfactoriamente la biomasa del agua tratada, y particularmente, cuando se produce el fenómeno de bulking, pues el lodo del tanque sedimentador gana volumen y se vuelve ligero y esponjoso, como lo menciona la EPA (5), fluyendo a lo largo de los vertederos con el efluente. Esta situación afecta el sistema desde dos ópticas: un aumento en la demanda biológica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos totales (SST) a la salida del sistema, con posibilidad de superar los límites permisibles de descarga exigidos por la autoridad ambiental, y la posible pérdida de biomasa del sistema que pone en riesgo el estado estacionario del proceso biológico.

Los reactores de mezcla completa que son alimentados con flujo continuo tienden a presentar el problema del bulking filamentoso con mayor índice de probabilidad que aquellos que son alimentados de manera discontinua o por baches; del mismo modo que los reactores flujo pistón, Rensink (6). La solución adoptada por la mayoría de las plantas de tratamiento en Colombia, que enfrentan este problema, es la adición de agentes oxidantes químicos como el cloro, peróxido de hidrógeno u ozono (7), eliminando el problema de manera no-selectiva, pues si las condiciones que lo generan no son corregidas, seguirá ocurriendo de por vida. Otras de las soluciones que se adoptan, son las selectivas biológicas ya sea cinética o metabólicamente.

A escala real, el bulking filamentoso es una situación desfavorable y un mal manejo de éste puede llevar a suspender las operaciones de la planta y, obligatoriamente, convertirse en un incremento en costos (8). A escala de laboratorio algunas universidades, presentadas más adelante en el Capítulo 2.6, han reportado la aparición del fenómeno, pero el principal problema que se evidencia es el desinterés por investigar al respecto, pues se opta por una solución facilista de descarte del lodo con bulking y se re-inocula con un lodo de una planta que podría estar tratando aguas de características completamente diferentes al agua sintética que emplea.

## **2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Comprobar, a escala de laboratorio, los efectos de la forma de alimentación (continua o intermitente) y la cantidad de inóculo sobre el hinchamiento de los lodos de reactores aerobios de mezcla completa en etapa de arranque.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar seguimiento y análisis del índice volumétrico de lodos y de la comunidad microscópica en dos reactores aerobios de mezcla completa a escala de laboratorio que operan en paralelo y que registran regímenes de flujo distintos.
- Realizar seguimiento y análisis del índice volumétrico de lodos y de la comunidad microscópica en tres reactores aerobios de mezcla completa a escala de laboratorio que operan en flujo continuo, con diferentes concentraciones iniciales de inóculo.

### 3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

- El hinchamiento del lodo en un reactor aerobio de mezcla completa y flujo continuo en fase de arranque, puede prevenirse empleando un régimen de flujo de alimentación intermitente, siempre y cuando se controlen otras variables de interés como nutrientes, pH y oxígeno disuelto.
- La cantidad de inóculo que se emplea en el arranque de reactores aerobios de mezcla completa y flujo continuo, retarda la aparición de microorganismos filamentosos.

#### 4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El desarrollo de un trabajo práctico-investigativo que permita demostrar la influencia tanto del efecto del uso de un inóculo en el arranque de un reactor aerobio de mezcla completa, como del régimen de flujo sobre la aparición del fenómeno de bulking filamentoso aporta información valiosa y de interés dada la escasa información que se reporta a nivel local e incluso nacional. Igualmente, se estaría brindando información de mucha utilidad a estudiantes de diferentes universidades que exploran propuestas sobre el tratamiento y eliminación del fenómeno de bulking filamentoso, generalmente presente en reactores utilizados a escala de laboratorio. Dicha información es especialmente valiosa cuando se sabe que la solución habitualmente adoptada para enfrentar el problema es el descarte de dicho lodo y el comienzo de otro sistema desde cero con la pérdida de recursos valiosos como el tiempo y el esfuerzo del equipo investigador.

El estudio cobra inclusive mayor valor práctico cuando se analiza el caso de la industria. La mayoría de ellas tratan sus aguas de desecho con reactores aerobios biológicos tal y como lo mencionan la firma colombiana de ingeniería y construcción *Tecniaguas* (9), y la empresa norteamericana *Hanna instruments* (10). Estas plantas generalmente comienzan a trabajarse con un inóculo tomado de otra planta en funcionamiento y son alimentados, en algunos casos, de manera continua; presentando comúnmente el fenómeno de hinchamiento de lodos (en unos casos con mayor severidad que en otros). La solución adoptada de manera provisional y no selectiva, es la adición de agentes oxidantes en bajas concentraciones, provocando la eliminación no sólo de las bacterias filamentosas, sino también de aquellas que no lo son como lo confirman, entre otros autores, Caravelli y colaboradores (11). El problema es que al seguir trabajando bajo las mismas condiciones, el fenómeno seguirá apareciendo frecuentemente desde que su causa no sea corregida. Además, la adición reiterativa de agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, cloro, ozono y demás, se ve representada en altos costos de operación para las plantas de tratamiento.



## CAPÍTULO II

# MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1. ANTECEDENTES

El contacto del agua residual con lodo biológicamente activo para remover contaminantes degradables del agua es una técnica ampliamente empleada desde su creación en Inglaterra en 1914 (12). El tratamiento de los lodos activados, como su nombre lo indica, es un proceso que implica la producción de una masa de microorganismos capaces de estabilizar y depurar el contenido orgánico de los contaminantes del agua residual en presencia de oxígeno (13).

Entre los diferentes tipos de tratamientos con lodos activados, está el llamado “aerobio de mezcla completa” que consiste básicamente, como lo describe Tomilson (14), en dos tanques: un primer tanque de aireación, donde se da la mezcla del agua residual ó afluente con el lodo activo por medio de la oxigenación y mezcla mecánica del mismo, pasando al segundo tanque sedimentador, que permite la separación gravitacional del lodo con el agua tratada.

#### 1.1 BULKING FILAMENTOSO

Como lo confirman Albertson (15), Martins (16) y Pagilla (17), entre otros, los problemas de sedimentabilidad en reactores biológicos de mezcla completa se comenzaron a percibir paralelamente con la evolución del régimen hidráulico de alimentación por tandas (flujo intermitente) al de flujo continuo a mediados del siglo XIX. Otros autores se pronunciaron al respecto con diferentes teorías, como el ingeniero Donaldson (18) argumentando que el cambio de los reactores de flujo pistón\* (que permiten cambios en el comportamiento hidráulico y régimen de distribución del sustrato) a mezcla completa, fue un factor importante que colaboró al crecimiento de los problemas de sedimentabilidad que se estaban presentando. Sin embargo, el tratamiento con lodos activados de mezcla completa y alimentación en forma continua, seguían siendo el diseño preferido de la época.

Carentes de índices para medir la sedimentabilidad del lodo (IVL, IVLD, entre otros), los investigadores y profesionales del siglo XIX llamaron “*inestabilidad del*

---

\* También conocido como reactor tubular, que consiste en un tubo cilíndrico y normalmente se opera en estado estacionario. En el reactor de flujo pistón, los reactivos del agua residual se consumen gradualmente en sentido axial (de izquierda a derecha) a medida que fluye a lo largo del reactor, siendo a la entrada de este, la mayor concentración de reactivos y a la salida de este, se tiene el agua residual tratada y se da paso al sedimentador.

proceso” o “*in-sedimentabilidad de los lodos*” a lo que hoy se conoce como bulking filamentoso (19).

Autores como Rensink (6), Tomilson (14) y Verachtert (20), reabren la discusión acerca del efecto del patrón de alimentación sobre el bulking en 1970, cuando varios estudios mostraron la ventaja del uso de tanques de flujo pistón (que trabajan con altos niveles de sustrato sobre microorganismos: alta relación F/M) sobre los mezcla completa con alimentación continua, confirmando la teoría de Donaldson (18).

Inquietos por solucionar el problema de la sedimentabilidad, Pasveer (21) estudió el uso de los reactores “*fill and draw*”<sup>\*</sup> para luego desarrollar la tecnología de las zanjas de oxidación<sup>\*\*</sup>. Este sistema tuvo gran acogida en Europa y los Estados Unidos en los años 70, pero una vez más, estos sistemas fueron cambiados a flujo continuo seguido de un sedimentador y la recirculación de los lodos. En 1969, Pasveer (22) demostró que la alimentación intermitente en zanjas de oxidación producían un lodo con mejor sedimentabilidad que las zanjas alimentadas de manera continua.

A comienzos de los años 70, Irvine y colaboradores (23), renombraron el proceso de alimentación con régimen periódico como SBR (Por sus siglas en inglés: *Sequencing Batch Reactor*), que en español es conocido como reactor en serie con régimen de alimentación “por baches”.

En 1976, un estudio realizado por el centro de investigación de las aguas (24) hizo referencia a dos puntos: primero establecer la extensión del problema de bulking y segundo intentar descifrar algunas de sus causas. En éste se estableció que no existe una única causa para la existencia del mismo y que éste se presentaba ampliamente en Europa, Norte América y algunos casos en Australia.

Desde las publicaciones de Eikelboom (25) y Buijsen (26) en 1981, se ha entendido un poco mejor el bulking filamentoso, sus causas y control. Las aproximaciones a la identificación de las bacterias filamentosas han sido actualizadas y modificadas por Jenkins (27) en 1993 y se siguen utilizando ampliamente hasta la actualidad, incluso se tienen aproximaciones de cómo controlar el bulking identificando separadamente las bacterias filamentosas: “Una vez se identifica la causa de la aparición de las filamentosas, mínimo se reconoce el tipo de bacteria filamentosa, sus causas podrían ser determinadas y también

---

\* Los sistemas “Fill and draw” consistían básicamente en la descarga del agua residual en un tanque donde ocurría la aireación por cierta cantidad de tiempo, y luego se dejaba sedimentar en el mismo tanque, permitiendo la separación de ambas fases.

\*\* Una zanja de oxidación es una modificación del sistema biológico de tratamiento con lodos activados que utiliza un tiempo extenso de retención de sólidos. Funcionan normalmente como sistemas de mezcla completa, pero pueden ser modificados para simular las condiciones de flujo en pistón.



pueden ser encontradas las medidas apropiadas para cada filamento” afirma Richard (28).

## 1.2 APROXIMACIONES AL CONTROL DEL BULKING FILAMENTOSO

**1.2.1 Métodos físico-químicos.** “El mantenimiento de un nivel óptimo de microorganismos filamentosos en el lodo activado es necesario para un sedimentado eficiente. Sin embargo, es necesario tener un buen diseño de los tanques para prevenir un crecimiento excesivo de los microorganismos filamentosos que causan el bulking. Algunos de los diseños innovadores son muy recientes, razón por la cual, muchas plantas no los han acogido todavía. En dichas plantas, el hinchamiento de los lodos debe ser corregido con ajustes en las operaciones ó con la adición de químicos” según documento presentado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos - EPA en 1987 (5).

- **Adición de químicos para mejorar la sedimentabilidad de los lodos.** El reto de la técnica de la adición de químicos está en mejorar la sedimentabilidad de los lodos sin destruir los microorganismos filamentosos, como:
  - **Polímeros sintéticos y coagulantes.** Agregados al lodo en el tanque de aireación, o en el paso al sedimentador, ayudando a compactar el floc filamentosos difuso. El polímero usado generalmente es un polímero de alto peso molecular, de carga catiónica y debe ser aplicado sólo o en combinación con un polímero de carga aniónica. Su control con polímeros resulta costoso, pues se han reportado casos de hasta \$ 450 dólares (en el año 2003) por millón de galones tratados. En algunas estancias, algunos coagulantes como la limadura de hierro pueden ser bastante útiles (28).
- **Adición de químicos para eliminar selectivamente los microorganismos filamentosos.** La adición de agentes químicos a los reactores aerobios para la eliminación del bulking filamentosos es uno de los procesos más comunes llevados a cabo hoy en día en las empresas, algunos de los agentes oxidantes son:
  - **Cloro:** El control del bulking por cloración es el más ampliamente utilizado por las plantas de tratamiento (28), pues el 50 % de ellas, a pesar de ser un poco costoso, tienen siempre una reserva de cloro para cuando se presente el problema. El objetivo de la cloración es someter al lodo a una cantidad específica de cloro para causar un daño en los filamentos pero sin tocar a los microorganismos formadores de floc.

- **Peróxido de hidrógeno:** El uso del peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ha sido efectivo en reactores flujo continuo y bache. Se presume que ataca a los microorganismos filamentosos destruyendo su forma, progresando en su deformación como pasa en la cloración.

En general, los métodos químicos como el cloro, el peróxido, el ozono y demás, son soluciones a corto plazo, que se deben seguir implementando cada que se presente el problema, sin darle a éste una solución definitiva.

- **Métodos físicos:** Cuando se habla de métodos físicos para la eliminación del bulking, se habla básicamente del rediseño de los tanques ya sea sedimentador o tanque de aireación para desfavorecer el crecimiento de las bacterias filamentosas.

En la actualidad, se estudia el uso de preparados enzimáticos y microbiológicos, como algunas especies de ciliados (29), que son predadores de las bacterias filamentosas.

**1.2.2 Métodos selectivos para el control del Bulking filamentoso.** Galarza (29) explica de manera concisa en qué consisten los métodos selectivos para el control del bulking filamentoso: “Los métodos selectivos son aquellos métodos biológicos dirigidos a obtener una composición adecuada de la biocenosis del lodo activo con base en las diferencias cinéticas y metabólicas entre organismos filamentosos y floculantes. Son, por lo tanto, métodos preventivos del bulking filamentoso, que corrigen las condiciones de operación de la planta con base en el conocimiento de las causas de la aparición del bulking”.

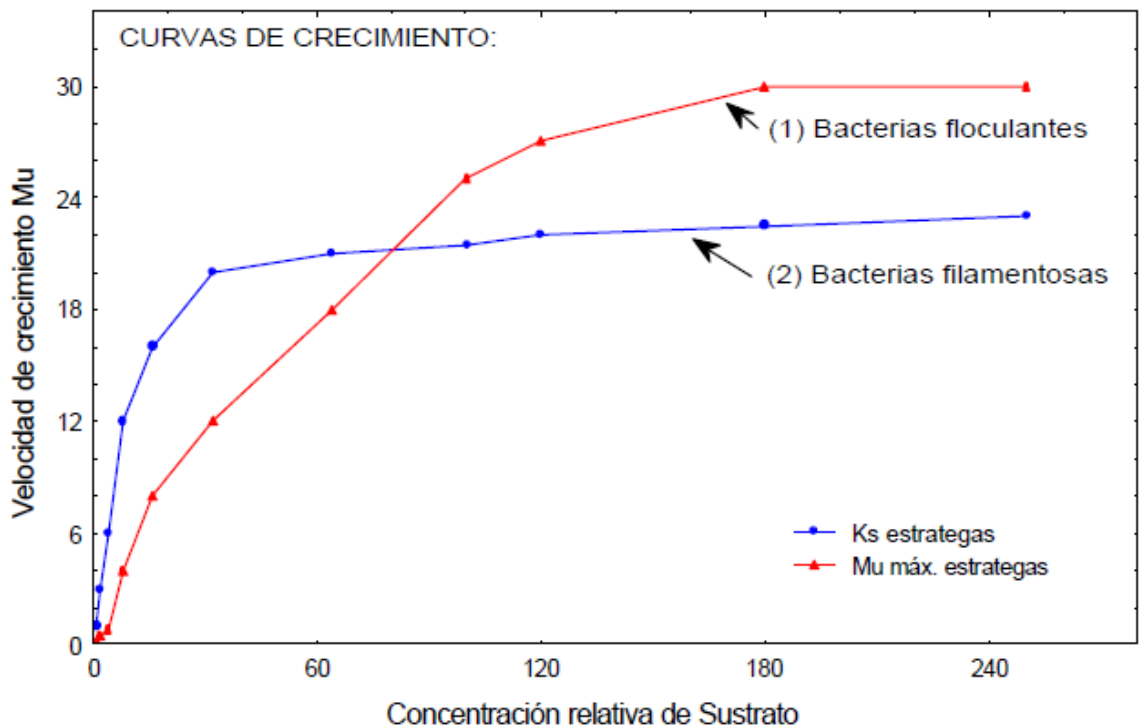
- **Selección cinética:** (30) La selección cinética se basa en la dependencia de la tasa de crecimiento que presentan distintos microorganismos en un cultivo mixto respecto a las condiciones de operación. Su objetivo es adecuar la operación de la planta de modo que se favorezca el crecimiento de los microorganismos floculantes.

Los principales factores que determinan el tipo de microorganismo, floculantes o filamentosos, cuyo crecimiento se ve favorecido son los siguientes (31):

- **Composición del agua residual:** las bacterias filamentosas tienen un mayor acceso a la materia orgánica fácilmente biodegradable, mientras que las floculantes acceden con mayor facilidad a los productos de la hidrólisis.
- **Edad del lodo:** los microorganismos filamentosos presentan, en general, una lenta cinética y, por lo tanto, se ven favorecidos por valores altos de tiempos de retención.

- **Concentración de sustrato en el reactor:** se presentan dos casos: en el primero, conocido como crecimiento equilibrado, el sustrato es el único factor limitante del crecimiento, por lo que la eliminación del sustrato se produce de forma paralela al crecimiento bacteriano. En este caso, los microorganismos filamentosos presentan, en general, una mayor afinidad por el sustrato en condiciones de baja concentración de sustrato, mientras que las floculantes presentan una mayor afinidad a altas concentraciones de sustrato, tal y como se observa en la Figura 3.

**Figura 3** Tasa de crecimiento específico para microorganismos filamentosos y formadores de floc a diferentes concentraciones de sustrato



Fuente: Walter Di Marzio y colaboradores, Control de organismos filamentosos mediante selección cinética y metabólica en sistemas de lodos activados, Argentina, 2000.

Cuando la concentración de sustrato es elevada se produce una eliminación rápida del mismo con bajos consumos de oxígeno, lo que se conoce como crecimiento no-equilibrado. Algunos autores como Grau (32), suponen que parte del sustrato es almacenado por el microorganismo en lugar de ser empleado para el crecimiento bacteriano. Las bacterias floculantes presentan una mayor

capacidad de almacenamiento de sustrato, especialmente tras ser sometidas a un periodo de inanición que regenera su capacidad de almacenamiento. La materia orgánica almacenada de esta forma favorece su supervivencia posterior en condiciones de baja concentración de sustrato.

- **Nivel de oxígeno disuelto:** algunas bacterias filamentosas presentan una alta afinidad por el oxígeno con niveles de oxígeno bajos.
- **pH y temperatura:** en condiciones de pH bajo pueden aparecer hongos, mientras que las variaciones de temperatura influyen en el tipo de bacteria filamentosas dominante en el lodo y las espumas.

Teniendo en cuenta estas diferencias en las condiciones cinéticas en las bacterias filamentosas y aquellas formadoras de floc, se implementan métodos de selección como la disminución de la edad del lodo, la compartimentación del reactor (asimilándose a un flujo pistón), la exposición del lodo a un periodo suficiente de inanición (en unidades conocidas como “selectores biológicos” o “zonas selectoras”), que elimina las bacterias filamentosas con alta energía de mantenimiento y regenera la capacidad de almacenamiento de las bacterias floculantes, de igual manera el control de un OD mayor a 2 ppm y un pH mayor o igual a 6,5 unidades de pH.

- **Selección metabólica.** La base de este método es la incapacidad de algunas bacterias filamentosas para obtener energía en más de un proceso metabólico. Así, las bacterias cuyo crecimiento se produce únicamente en condiciones óxicas pueden ser eliminadas mediante zonas anóxicas y/o anaerobias. A diferencia de la selección cinética, la selección metabólica no favorece el crecimiento de floculantes, sino que elimina las bacterias filamentosas (31).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 LODOS ACTIVADOS**

El proceso de lodos activados es el más empleado en el tratamiento secundario convencional de las aguas residuales domésticas (33). El proceso de lodos activados y sus modificaciones pueden definirse como el contacto del floc biológico ya formado con los desechos que entran al tanque de aireación, el cual cuenta con suficiente oxígeno disuelto para mantener condiciones aeróbicas a través de todo el proceso, seguido de la separación sólido-líquido en el tanque de sedimentación (34).

Como lo describe Miranda (35), el proceso biológico de lodos activados está constituido por bacterias, protozoos, hongos, algas y organismos filamentosos. Los hongos y las algas generalmente no tienen una gran importancia dentro del proceso, mientras que los protozoos, los organismos filamentosos y las bacterias participan activamente en el tratamiento biológico del agua residual. Las bacterias constituyen la mayor parte de la biomasa del proceso, siendo el grupo dominante dentro de la comunidad biótica de los lodos activados.

### **2.2 INÓCULO**

Si se pone en operación una planta de tratamiento nueva, puede ser muy conveniente “sembrar” o inocular la planta con lodos activados provenientes de una planta cercana, afirma el Ingeniero López (34).

Si no se dispone de lodos activados, es necesario incubarlos de acuerdo a lo planteado por Orozco (36). Para ello se toma cierto volumen (dependiendo del volumen del reactor a trabajar) de agua residual a tratar, se le ajusta el pH, de ser necesario se le agregan nutrientes (N y P), y si existen tóxicos estos deben ser eliminados. Se airea durante varios días al cabo de los cuales ya deben haber aparecido algunos lodos. Se dejan asentar, se elimina el sobrenadante y se llena de nuevo con más agua residual, y así sucesivamente hasta obtener cantidad suficiente de sólidos suspendidos (mayor a 1000 mg/L de SST). Una vez alcanzada la cantidad adecuada de inóculo, que depende también de la relación F/M que se desea trabajar, se dispone en el reactor y se comienza a alimentar de manera continua.

### 2.3 AGUA RESIDUAL SINTÉTICA

Como todo organismo viviente, la biomasa también necesita alimento. En el caso de plantas de tratamiento de aguas residuales a escala real, el agua afluyente deberá contener el material que le proporcionará a los microorganismos la energía para respirar y crear más material celular.

A escala de laboratorio existen las opciones de utilizar agua residual cruda o real (procedente de procesos domésticos o industriales) o agua residual sintética (condiciones simuladas en laboratorio). Sin embargo, el conseguir agua residual real significa también tener la capacidad de transporte y almacenamiento, lo que se traduce finalmente en costos. Al usar agua residual sintética se eliminan muchas variables al conocer de primera mano las características y composición general del agua a tratar, además de que resulta mucho más práctico crearla en el laboratorio a medida que se va necesitando (37).

No existe una fórmula única para la preparación de un agua residual sintética, pues su composición variará según el tipo de ensayos y experimentos que se quieran realizar. A pesar de esto hay un consenso en que el agua residual sintética preparada deberá estar estandarizada, de lo contrario los resultados obtenidos sólo aplicarán para el tipo de agua que se utilizó (38).

En el trabajo realizado por Gaudy y sus colaboradores (39) se expresa que los constituyentes inorgánicos y sus concentraciones del agua residual sintética que emplearon en sus ensayos estuvieron basados en los requerimientos para un crecimiento bacteriano óptimo reportado por la literatura; es así como la ingeniería de aguas se apoya en los avances de la microbiología en materia de nutrientes para el buen desarrollo de la biomasa.

Además del agua residual, que será la “materia prima” de cualquier tratamiento de aguas residuales, se deberán garantizar unas condiciones que permitan la sobrevivencia y buen desarrollo de la biomasa.

### 2.4 CONDICIONES ÓPTIMAS

La empresa norteamericana de soluciones ambientales *Environmental Leverage*, reconoce por lo menos cinco medidas críticas que deben ser monitoreadas y controladas efectivamente para llevar a cabo un tratamiento biológico eficientemente. Estas son: oxígeno disuelto, temperatura, pH, amonio y orto-fósforo (40).

Los valores consignados por tal empresa se presentan a continuación en la Tabla 1:

**Tabla 1** Medidas básicas para el monitoreo de reactores biológicos aerobios

<b>PARÁMETRO</b>	<b>ACEPTABLE</b>	<b>ÓPTIMO</b>
Oxígeno disuelto	Mayor a 0,5 mg/L	1,0 – 2,0 mg/L
Temperatura	4,4 – 35 °C	25 – 35 °C
pH	6,0 – 9,5	7,5 – 8,5
Amonio residual*	1,0 – 3,0 mg/L	2,0 – 3,0 mg/L
Orto-fósforo residual*	0,5 – 2,0 mg/L	1,0 – 2,0 mg/L
*Se deben realizar las medidas al efluente		

Fuente: *Environmental Leverage*, 2009.

Según Richard (41), las concentraciones bajas de oxígeno disuelto son propicias para el crecimiento excesivo de bacterias filamentosas, en condiciones de temperaturas altas y bajas también se ha observado el crecimiento indeseado de este tipo de microorganismos y en casos donde el pH es menor a 6 unidades de pH se tiene la proliferación de hongos filamentosos. Por otro lado, cuando existe una deficiencia de nitrógeno o fósforo, normalmente tiene lugar una superproducción de polisacáridos y como consecuencia el lodo pasa a tener una pobre sedimentabilidad, un posible efecto bulking y problemas en su deshidratación (42).

Los países del trópico tienen una variable menos de que preocuparse al no tener estaciones tan marcadas como Estados Unidos o algunos países del continente europeo. En esos últimos casos, se hace necesario adoptar medidas de control de temperatura, lo que obviamente incrementa los costos del proceso de tratamiento.

A escala de laboratorio, el OD, ligado en buena parte a la temperatura\*, debe asegurarse, por ejemplo, mediante aireadores comunes de pecera. Estos, además de proporcionar el oxígeno que los microorganismos necesitan, crearán condiciones de agitación y mezcla dentro del reactor.

A pesar de todo lo anterior, aún cumpliéndose los requerimientos nutricionales de la biomasa con el agua residual sintética, y cumpliendo los rangos conocidos para garantizar las condiciones óptimas del crecimiento de los microorganismos, el crecimiento excesivo de los microorganismos filamentosos puede tener lugar.

---

\* La concentración de oxígeno en el agua será inversamente proporcional a la temperatura de la misma. Además intervendrán otros factores como la respiración o la fotosíntesis.

## **2.5 BULKING FILAMENTOSO**

Según Pickett (43), los sistemas de lodos activados al involucrar mezcla completa se convierten en medios ideales para provocar la aparición de bulking filamentoso. En ese mismo sentido, habría que buscar un sistema flujo pistón, o ensayar los selectores previos al reactor. A escala real podría llegar a ser mucho más costoso pasar de una configuración mezcla completa a un flujo pistón, por lo que se aconseja evaluar la posibilidad de construir selectores que antecedan al reactor.

Para Jenkins (44), el problema con el bulking filamentoso y no filamentoso va mucho más allá de la mera mezcla que se dé en el reactor. Según él, el reactor aerobio mezcla completa que está unido al sedimentador (uno de los modelos más trabajados a escala de laboratorio) es el peor tipo de reactor para manejar lodos con mala sedimentabilidad (44), esto porque no se tiene ningún control sobre la tasa de transferencia de lodos desde el reactor hacia el sedimentador y viceversa. Para solucionarlo deberían separarse ambos compartimentos y ayudarse de una bomba para mover lodos de una unidad a otra. Otra característica negativa del modelo según Jenkins (44) es el hecho de que se emplee la aireación con otro fin adicional al de airear, como es el de mezclar. Para él, la mejor forma de combatir los lodos con mala sedimentabilidad en este tipo de reactores, es el crear gradientes de concentración de sustrato al añadir compartimentos al reactor, o cambiando de alimentación continua a intermitente.

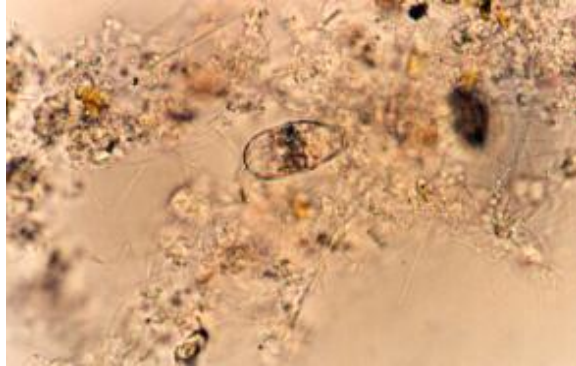
## **2.6 CASOS DE BULKING FILAMENTOSO EN REACTORES AEROBIOS MEZCLA COMPLETA A ESCALA DE LABORATORIO**

**2.6.1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.** El grupo de Méndez y sus colaboradores (45) afirmó que un sistema alimentado con aguas residuales crudas (reales) tiene mayor tendencia al bulking que aquel alimentado con agua residual sintética, después de haber experimentado episodios de hinchamiento al alimentar varios reactores con agua residual sintética y luego con agua residual real.

La forma de alimentación fue continua y emplearon como inóculo lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales de los Jardines de la Paz, en La Molina (Perú), además de estiércol de ganado vacuno y abono de jardín. En la Figura 4 se aprecia el floc y los filamentos formados en uno de los reactores.



**Figura 4** Difflugia sp, con filamentos y floc

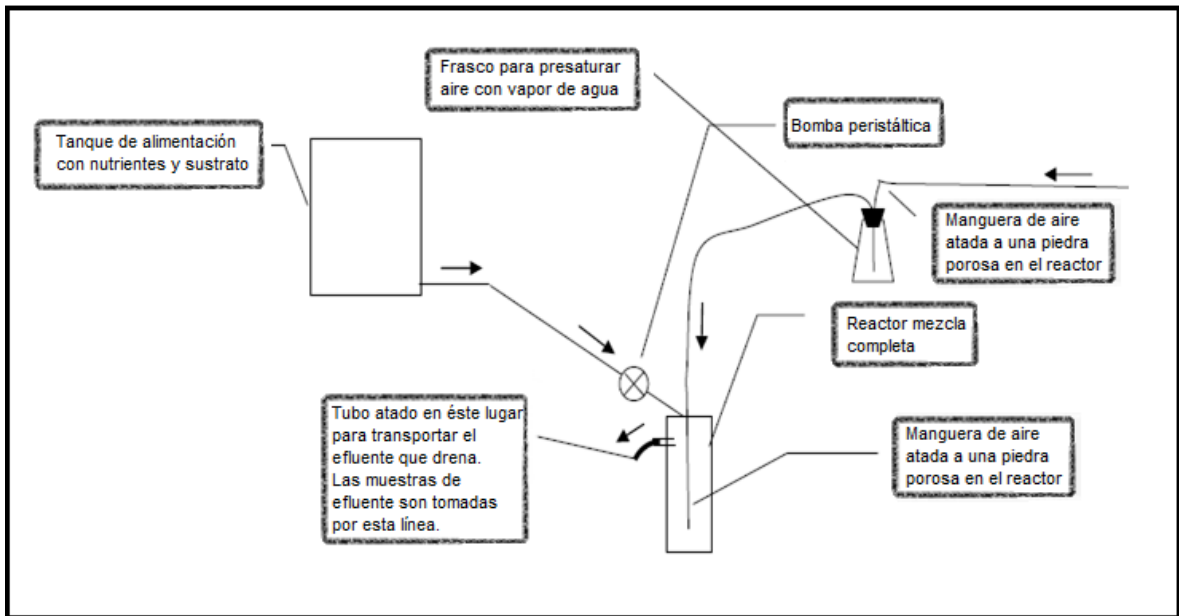


Fuente: Revista del Instituto de Investigación FIGMMG Vol. 7, N.º 14, 74-83 (2004) Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

**2.6.2 Universidad de Delaware, Estados Unidos.** En el laboratorio de ingeniería ambiental, perteneciente al departamento de ingeniería civil y ambiental de la Universidad de Delaware, se realiza el montaje de reactores mezcla completa con el fin de determinar la tratabilidad del acetato de sodio; esto con fines académicos para los estudiantes de pregrado y postgrado. Según afirma el profesor encargado del laboratorio, Imhoff (46), es común y aceptado que se presenten episodios de bulking, pues estos sirven para que los estudiantes se enfrenten a problemas reales en el tratamiento de aguas residuales.

La forma de alimentación es continua, no hay control de pH en el agua residual afluente ni en el reactor, y el inóculo empleado es de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Wilmington (47). El montaje experimental que se realizó, se ilustra en la Figura 5.

**Figura 5** Montaje experimental realizado en la Universidad de Delaware para la determinación de la tratabilidad del acetato de sodio



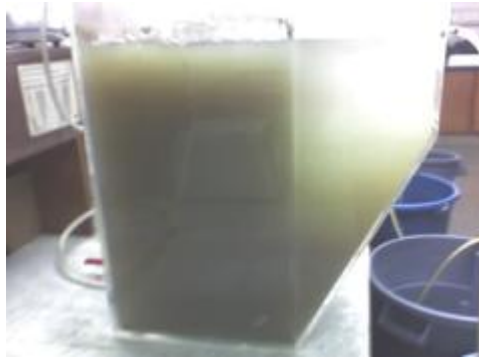
Fuente: Guía de laboratorio de la Universidad de Delaware “*Laboratory Exercise #6*” (12), 2008.

**2.6.3 Universidad de Antioquia, Colombia.** En el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Antioquia (UdeA) se realiza semestralmente el montaje de reactores aerobios mezcla completa, con el objetivo de presentar los elementos básicos conceptuales y las bases de diseño para la comprensión y entendimiento de los procesos biológicos aplicados en el control de la contaminación (48).

Los sustratos empleados pasan por una serie de soluciones, entre las que están alcoholes; vinazas y licor adulterado. Según Molina (49), es recurrente la aparición de bacterias filamentosas que causan el lavado de los reactores. Hasta la fecha no se ha encontrado ninguna medida correctiva, y semestre tras semestre debe descartarse el contenido de los reactores y llenarse de nuevo con más inóculo. En la Figura 6 se presenta una foto de los reactores utilizados por la Universidad.

La forma de alimentación de los reactores es continua y como inóculo se emplea lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas de San Fernando (en Medellín, Colombia).

**Figura 6** Reactor aerobio mezcla completa en flujo continuo alimentado con licor adulterado



Fuente: Elaboración propia, 2009.

**2.6.4 Universidad de Medellín, Colombia.** En el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Medellín (UdeM), al igual que en la UdeA, se realiza el montaje de reactores aerobios mezcla completa y el sustrato empleado suele ser leche entera líquida. Se adicionan algunos macro y micronutrientes y se toman las mediciones propias para la determinación de las constantes biocinéticas. La suerte de muchos de los reactores es el lavado de la biomasa debido a la aparición excesiva de filamentos y tampoco se ha logrado adoptar una medida preventiva o correctiva. Uno de los reactores que ha sufrido severo efecto de lavado, al poco tiempo de haber arrancado, en los laboratorios de procesos biológicos de la UdeM se presenta en la Figura 7.

La forma de alimentación es continua y el inóculo empleado proveniente de la planta de tratamiento de aguas de San Fernando (Medellín, Colombia).

**Figura 7** Reactor deteriorado. Nótese como la sección de reacción y sedimentación lucen prácticamente iguales. Parte del lodo se ha perdido por lavado, y el resto permanece en el fondo del sistema por una mala mezcla



Fuente: Elaboración propia, 2008.

## 2.7 ALIMENTACIÓN CONTINUA

Como se observó en los estudios anteriormente descritos, y en general, en los ensayos a escala de laboratorio donde se emplean lodos activados, así como en plantas reales donde se tienen tratamientos convencionales, el flujo continuo o la alimentación continua son los más comunes. La cantidad de caudal que se le suministrará al sistema, dependerá en gran medida del Tiempo de Retención Hidráulico, expresado como se nota en la Ecuación 1.

$$TRH=V/Q \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- TRH: Tiempo de Retención Hidráulico [T] = (horas)
- V: Volumen del reactor [L<sup>3</sup>] = (litros)
- Q: Caudal [L<sup>3</sup>/T] = (litros/hora)

A escala real, se conocerá el dato de caudal y se asumirá un TRH acorde a la literatura; teniendo estos dos datos podrá dimensionarse entonces el reactor. A escala de laboratorio, suele tenerse un volumen definido para el reactor, y se deberá adoptar un TRH para finalmente hallar el caudal que deberá suministrársele al sistema.

Un rango de TRH típico para lodos activados puede estar entre tres y ocho horas (50). Debe tenerse en cuenta que cuando se presentan fenómenos de bulking, podría ser necesario aumentar el TRH, de esta forma se le da tiempo suficiente al lodo de sedimentar y no ser lavado. A escala real resulta imposible llevarlo a cabo, pero a escala de laboratorio se resume a disminuir el caudal de entrada al sistema. Esto no funcionará como solución al problema del hinchamiento, pero dará tiempo para trabajar sobre las causas y evitar la pérdida de biomasa.

## **2.8 ALIMENTACIÓN INTERMITENTE**

Según Jenkins (44), el cambio de flujo continuo a flujo intermitente en los reactores aerobios de mezcla completa que presentan bulking filamentoso puede ser la solución. A escala real significaría añadir estructuras de almacenamiento para ir dosificando el agua residual afluyente. Pero no debería descartarse la creación de un selector, pues el principio de acción es el mismo.

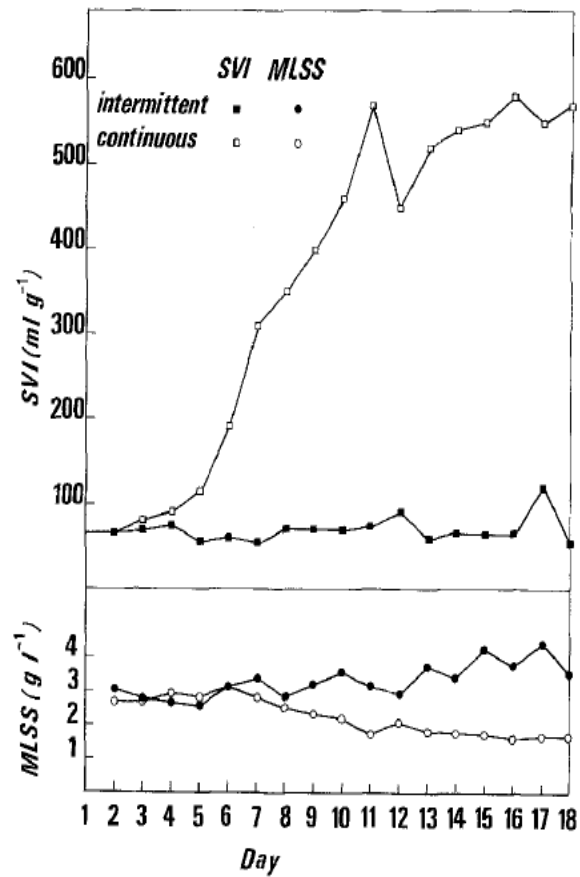
El tiempo durante el cual el agua residual está siendo dosificada al reactor correspondería (o simularía) al tiempo de contacto entre el agua residual y los microorganismos en un selector aerobio, y el periodo en que se corta el agua residual afluyente estaría simulando el tiempo de retención en el reactor aerobio mezcla completa (51).

A escala de laboratorio, para crear alimentación intermitente se puede adoptar un temporizador que toma control de la bomba dosificadora del sustrato, o agua residual sintética, y la administra según los periodos que se deseen.

## **2.9 ALIMENTACIÓN CONTINUA VS ALIMENTACIÓN INTERMITENTE**

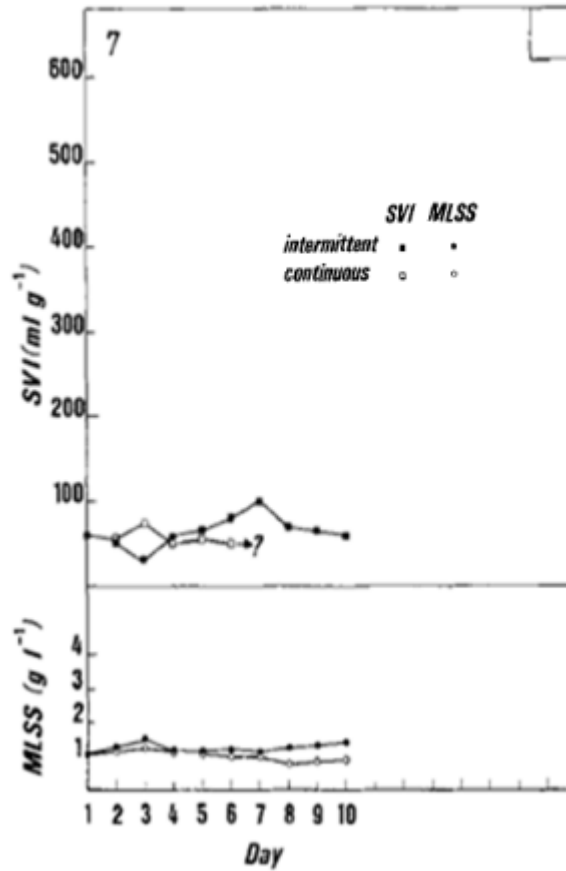
Estudios como los reportados por Houtmeyers y colaboradores (52), (20), (53), todos desarrollados en la década de los 80, detallan el comportamiento a escala de laboratorio para reactores aerobios mezcla completa, en los que existen comportamientos variables para el IVL al trabajarse bajo distintos regímenes de alimentación (continua e intermitente). Adicionalmente, se han empleado distintos tipos de sustrato y diferentes cantidades de SSV (52). Las Figura 8 a Figura 14 presentan los resultados hallados por la investigación y dejan claro que mejores IVL corresponden a la alimentación intermitente.

**Figura 8** Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa



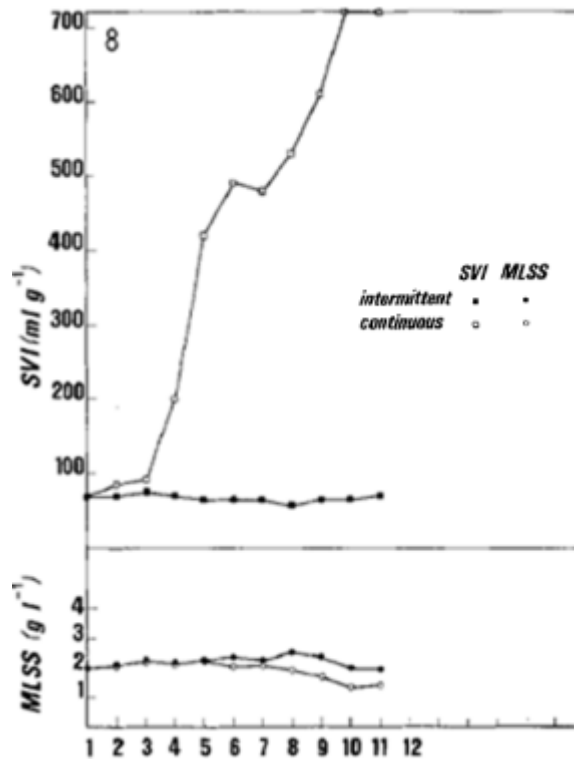
Fuente: *Relations between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes*. J. Houtmeyers, E. van den Eynde, R. Poffé, and H. Verachtert. Belgium. 1980.

**Figura 9** Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa. Operados con 1000 mg/L de SST



Fuente: *Relations Between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes*. J. Houtmeyers, E. van den Eynde, R. Poffé, and H. Verachtert. Belgium. 1980.

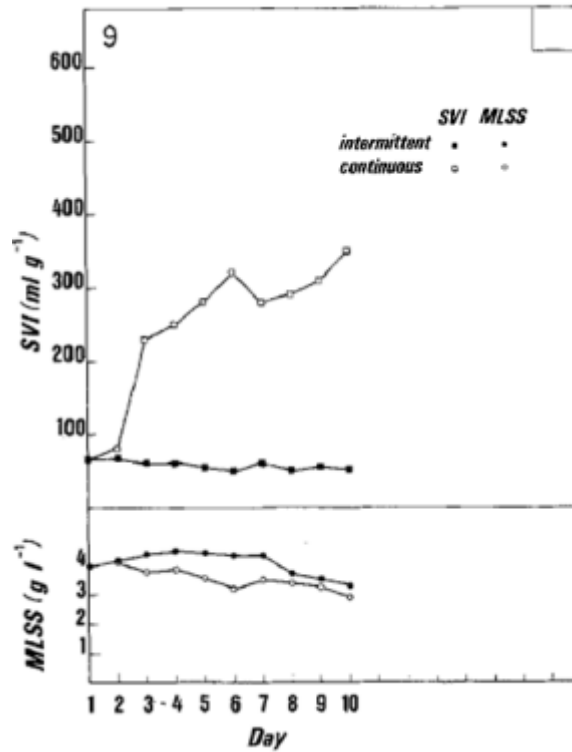
**Figura 10** Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa. Operados con 2000 mg/L de SST



Fuente: *Relations Between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes*. J. Houtmeyers, E. van den Eynde, R. Poffé, and H. Verachtert. Belgium. 1980.

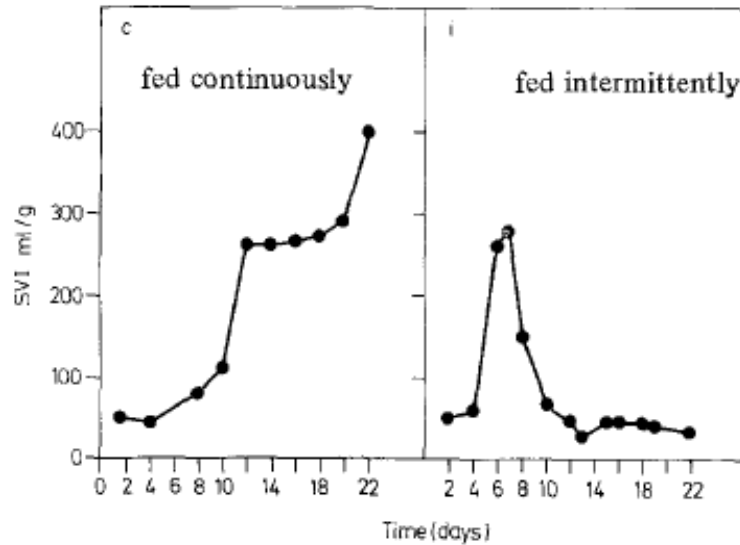


**Figura 11** Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con un sustrato cuya principal fuente de carbono fue glucosa. Operados con 4000 mg/L de SST



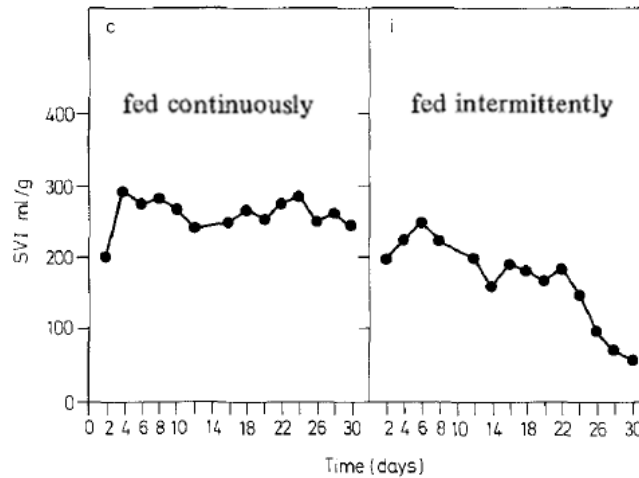
Fuente: *Relations between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes*. J. Houtmeyers, E. van den Eynde, R. Poffé, and H. Verachtert. Belgium. 1980.

**Figura 12** Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con aguas residuales de cervecería. Operados con 2000 mg/L de SST.



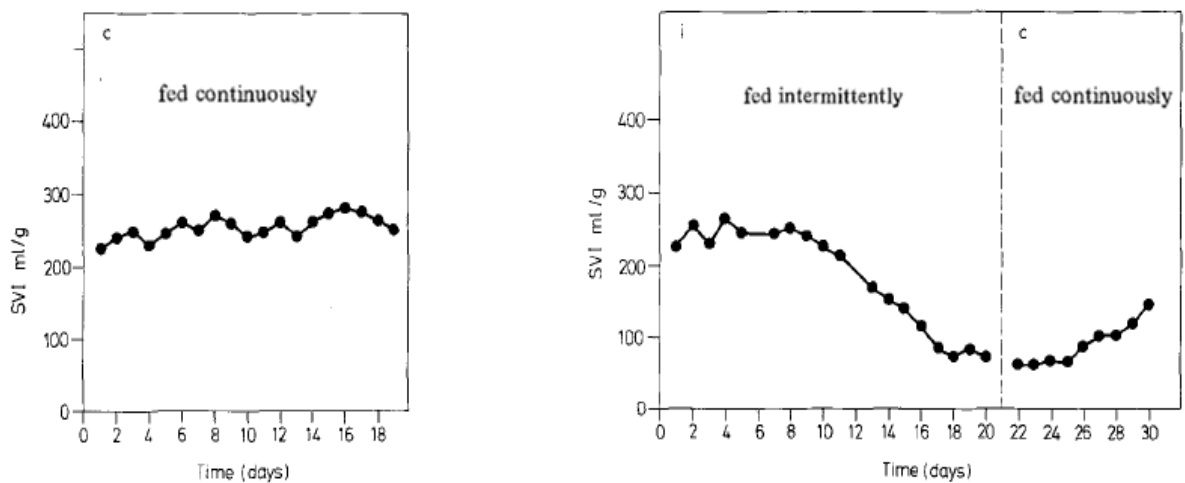
Fuente: *Relations between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes*. E. van den Eynde, L. Vriens, and H. Verachtert. Belgium. 1982.

**Figura 13** Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con aguas residuales de una industria petro-química. Operados con 4000 mg/L de SST



Fuente: *Relations between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes*. E. van den Eynde, L. Vriens, and H. Verachtert. Belgium. 1982.

**Figura 14** Reactores mezcla completa, con distintos regímenes de flujo, intermitente y continuo, fueron alimentados con aguas residuales de una industria láctea. Operados con 4000 mg/L de SST



Fuente: *Relations between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes*. E. van den Eynde, L. Vriens, and H. Verachtert. Belgium. 1982.

## 2.10 IVL Y LAS OBSERVACIONES AL MICROSCOPIO

Se define el Índice Volumétrico de Lodos (IVL) como el volumen en mililitros ocupado por 1 gramo de lodos luego de 30 minutos de sedimentación. Un IVL bajo es garantía de un buen tratamiento, al asegurar la “asentabilidad” de los lodos. Se considera que hay presencia de bulking si el IVL es mayor a 100 gramos/mililitro, y se habla de un bulking severo si el IVL es mayor a 300 g/mL (36).

La observación microscópica del lodo es uno de los análisis rutinarios más importantes que deben realizarse en una planta de lodos activados. La observación del aspecto del lodo permite deducir si el sistema está bien equilibrado o si existe alguna disfunción (54).

En términos generales, la presencia de organismos ciliados de libre movimiento son indicadores de crecimiento logarítmico, resultado de una relación F/M alta, y causante de un pobre asentamiento. Esto generalmente se asocia con un crecimiento disperso de bacterias. También se presenta cuando el OD es muy bajo, eliminando así a los protozoarios, depredadores naturales de los ciliados de libre movimiento. Los protozoarios desempeñan un papel muy importante en pulir el efluente al consumir bacterias suspendidas, mejorando la asentabilidad del lodo. En un buen lodo debe haber también ciliados activos con tallo, tales como las vorticelas, abundantes en lodos saludables. Por otra parte, los crecimientos filamentosos son la causa importante del abultamiento de los lodos, y como se ha dicho se deben a varias causas, entre ellas bajos niveles de pH y baja concentración de OD (36).



## CAPÍTULO III

# EXPLICACIÓN METODOLÓGICA

## CAPÍTULO III: EXPLICACIÓN METODOLÓGICA

### 1. ÁREA DE ESTUDIO

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de procesos bioquímicos del centro de laboratorios de la Universidad de Medellín - Colombia. La temperatura promedio en la zona es de 20°C y se encuentra localizado a una altura de 1538 msnm. En la Figura 15 se presenta una panorámica del laboratorio.

**Figura 15** Laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Medellín



Fuente: Elaboración propia, 2010.

## 2. MATERIALES Y EQUIPOS

### 2.1 MATERIALES Y REACTIVOS

A continuación se presentan todos y cada uno de los materiales que son necesarios para llevar a cabo la investigación propuesta. Dentro de los materiales se pueden observar reactivos que hacen las veces del sustrato, así como otros componentes relacionados con las determinaciones analíticas y demás actividades propias de la experimentación.

- Azúcar morena (Incauca<sup>\*</sup>): Aporte de carbono (DQO y/o DBO) al alimento de los reactores en el proceso
- Comida para perros (Ladrina<sup>\*\*</sup>): Aporte de carbono (DQO y/o DBO) al alimento de los reactores en el proceso
- Leche en polvo (Proleche<sup>\*\*\*</sup>): Aporte de carbono (DQO y/o DBO) al alimento de los reactores en el proceso
- Triple 15: Fuente de nitrógeno, fósforo y potasio para el alimento de los reactores
- Bicarbonato de sodio (Protokímica): Utilizado para controlar el pH en el reactor
- Filtros de 0.47mm (Adventure): Utilizados para la realización de la prueba de SST y SSV
- Agua destilada: Utilizada para el lavado de materiales y para el análisis de SSV
- Jabón yodado: Para el lavado de manos al finalizar la manipulación del reactor
- Mangueras de diferentes materiales y calibres: Utilizadas para la alimentación y la aireación de los reactores

---

<sup>\*</sup> **INCAUCA S.A.** Empresa agroindustrial dedicada al cultivo y procesamiento de la caña de azúcar para la obtención de azúcares y producción de alcohol carburante.

<sup>\*\*</sup> **LADRINA.** Alimento completo y balanceado para cachorros de todas las razas, producto de Purina (marca registrada).

<sup>\*\*\*</sup> **PROLECHE.** Empresa Nacional productora de leche.

- Solución Min I: Complemento de minerales para el crecimiento de la biomasa (se agregan al sustrato), compuesta por:
  - $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
  - $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
  - $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
  - $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
  - $\text{H}_3\text{BO}_3$
  - $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
  - $\text{ZnCl}_2$
- Solución Min II: Complemento mineral para los microorganismos presentes en el reactor, compuesto por:
  - $\text{CaCl}_2$
  - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

## 2.2 EQUIPOS

Se presentan algunas figuras que permiten detallar los reactores requeridos para la experimentación, así como algunos montajes o equipos específicos para su seguimiento.

- Recipiente de acrílico, reactor (Ver Figura 16): Medio para el crecimiento suspendido de la biomasa, con una zona sin movimiento para la sedimentación de la misma.



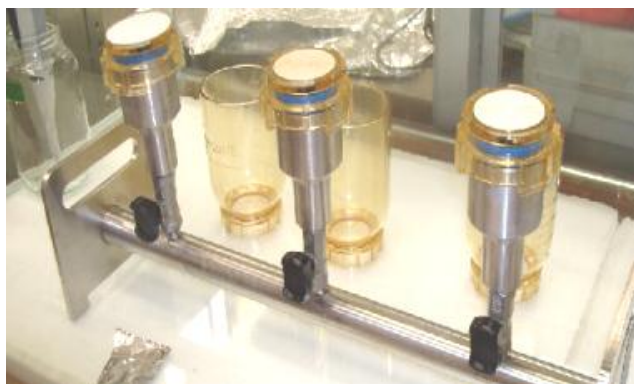
**Figura 16** Recipiente de acrílico (Reactor)



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Sistema de filtración por membrana (Ver Figura 17): Necesario para el análisis de SST y SSV en el reactor.

**Figura 17** Sistema de filtración de tres puestos



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Estufa *GCA Corporation Precision Scientific Group* modelo I6EG (Ver Figura 18): Utilizada para la realización de la prueba de SST y SSV.

**Figura 18** Estufa GCA



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Mufla Industrias Terrigeno, Medellín Colombia (Ver Figura 19) Utilizada para la realización de la prueba de SSV.

**Figura 19** Mufla para incineración de los sólidos



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Microscopio Olympus CH30 (Ver Figura 20): Usado para las observaciones en húmedo de la biomasa. Se emplearon los aumentos de 4X, 10X y 40X.

**Figura 20** Microscopio Olympus CH30 usado para las observaciones de la biomasa



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Bomba aireadora Atman At-A6500 (Ver Figura 21): Para el bombeo de aire al reactor para facilitar la mezcla y la aireación de la biomasa.

**Figura 21** Bomba aireadora de pecera marca Atman At-A6500



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Medidor de oxígeno *Handylab* de Schott (Ver Figura 22): Para la medición de los niveles de Oxígeno Disuelto en el reactor.

**Figura 22** Oxímetro *Handylab* OX1 de Schott para medición de OD



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Medidor de pH MTW pH320 (Ver Figura 23): Para el chequeo de los niveles de pH en el reactor.

**Figura 23** pH-metro WTW pH320 para seguimiento del pH del reactor



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Bomba peristáltica *Pump drive* PD5106 de Heidolph (Ver Figura 24): Utilizada para los reactores que trabajaron bajo alimentación continua. Bombeaba desde el recipiente con el ARS hacia el reactor.

**Figura 24** Bomba peristáltica *Pump drive* PD5106 de Heidolph



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Bomba de pecera sumergible de flujo continuo, Dolphin 300 (Ver Figura 25): Utilizada para el bombeo de alimento a los reactores con flujo intermitente. La intermitencia del flujo se lograba con la conexión de un *timer* o *temporizador*, (ver Figura 26) que se programaba con un tiempo determinado para apagar y encender la bomba, logrando así un caudal discontinuo, o con intervalos de tiempo de encendido y apagado programados con el *timer*.

**Figura 25** Bomba de pecera de flujo continuo sumergible Dolphin 300



Fuente: Elaboración propia, 2010.

- Temporizador Z PET-902A. Dispositivo electrónico sencillo (ver Figura 26), adherido a la bomba de pecera para encenderla y apagarla según los intervalos de alimentación e inanición programados.

**Figura 26** Temporizador Z TIMER modelo PET-902A



Fuente: Elaboración propia, 2010.

### 3. OBTENCIÓN DE BIOMASA PARA LOS EXPERIMENTOS

El inicio del proyecto experimental, requiere de la aclimatación de una biomasa o lodo que serviría como inóculo para los reactores en dos fases diferentes de experimentación.

Se preparó un agua residual sintética (ARS) a partir de una fórmula empleada por la empresa norteamericana ENVITREAT\* para la realización de ensayos de tratabilidad de aguas residuales. En la Tabla 2 se encuentran las cantidades utilizadas por dicha empresa. Para efectos prácticos, se hicieron pequeñas modificaciones en la preparación del sustrato y como resultado se obtuvo una nueva tabla con diferentes cantidades, ver Tabla 3.

---

\* *Environmental Treatment Assessment Specialists* (ENVITREAT).

**Tabla 2** Sustrato empleado por ENVITREAT

Azúcar	47	g/L
Celulosa	10	g/L
Comida de perro	40	g/L
Leche en polvo	4	g/L
Aceite vegetal	3	g/L
Soluciones Min I y Min II	50	g/L
NH <sub>4</sub> Cl	8	g/L
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2	g/L

Fuente: ENVITREAT, 2009.

**Tabla 3** Sustrato modificado de ENVITREAT

Azúcar	52,2	g/L
Comida de perro	44,4	g/L
Leche en polvo	4,44	g/L
Triple 15 (N y P)	20,9	g/L
Solución Min I	55,6	mL/L
Solución Min II	55,6	mL/L

Fuente: Elaboración propia, 2009.

Luego de tener la receta para el ARS, se procedió a su análisis en laboratorio, determinando los parámetros básicos que permiten corroborar que las cantidades y las relaciones cumplen con lo planeado. El análisis fue realizado por el laboratorio de la UdeM (certificado). La Tabla 4 presenta los resultados entregados por dicho laboratorio.

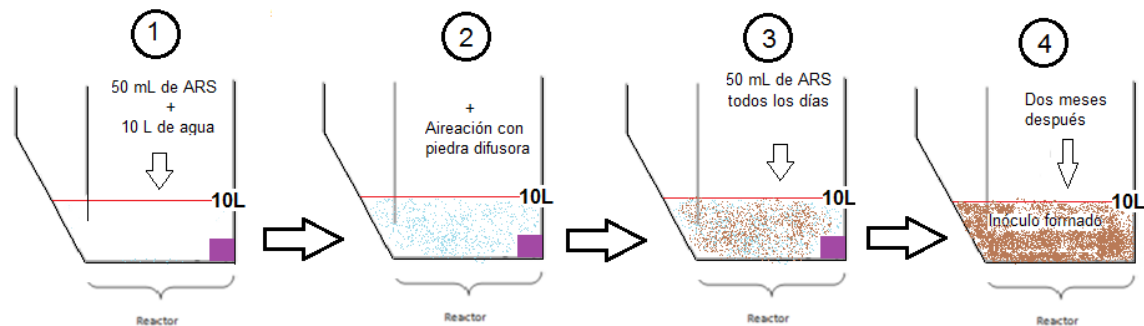
**Tabla 4** Resultados de laboratorio para el ARS empleada en los ensayos

Reporte de resultados	
Análisis	Resultado
DQO total (mg O <sub>2</sub> /L)	394.5
DQO soluble (mgO <sub>2</sub> /L)	247.2
DBO <sub>5</sub> total (mgO <sub>2</sub> /L)	155.4
Grasas y aceites (mg/L)	7.2
Fósforo total (mg P/L)	3.06
Nitrógeno total (mg/L)	13.8

Fuente: Universidad de Medellín, 2010.

Los lodos empleados para los ensayos fueron incubados directamente del ARS, siguiendo el procedimiento que menciona Orozco (36). En el recipiente de acrílico se vertieron 50 mililitros de ARS, se completaron con agua potable de la llave hasta un volumen de 10 litros y se aplicó aireación con una bomba aireadora de pecera de dos salidas, con piedras porosas en cada salida. El caudal teórico de aireación fue de 12 litros por minuto, y diariamente fue alimentado con cantidades que variaban entre 20 y 50 mililitros de ARS manteniendo siempre 10 litros de solución con el fin de crear un inóculo con altos SSV. La Figura 27 ilustra la creación del inóculo en el reactor.

**Figura 27** Creación del inóculo a partir del ARS para los ensayos realizados



Fuente: Elaboración propia, 2010.

Luego de un seguimiento diario a la biomasa por medio de observaciones al microscopio para establecer especies predominantes, medición de los niveles de Oxígeno Disuelto (OD), y control del pH con ayuda del pH-metro (en caso de



encontrarse valores inferiores a 7 – 7,5 unidades de pH se adicionaba bicarbonato de sodio), se alcanzó una concentración de 5225 mg/L de SST (4180 mg/L de SSV). (Ver Figura 28).

**Figura 28** Inóculo obtenido a partir del ARS, foto del 11 de junio de 2010



Fuente: Elaboración propia, 2010.

#### **4. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA PRIMERA FASE**

La primera fase es realizada con relación a una de las hipótesis planteadas: “El hinchamiento del lodo de un reactor aerobio de mezcla completa y flujo continuo en fase de arranque puede prevenirse empleando régimen de flujo de alimentación intermitente, siempre y cuando se controlen otras variables de interés como los nutrientes, el pH y el oxígeno disuelto”, por tal es necesario partir del inóculo creado y de allí generar biomasa para los dos reactores en paralelo.

Después de mantener alimentada la biomasa diariamente por 45 días, y tras haber alcanzado en la misma una concentración de 5225 mg/L de SST y 4180 mg/L de SSV, se procedió a dividirla en volúmenes iguales para iniciar 2 reactores aerobios en mezcla completa en paralelo. Uno de ellos fue alimentado en flujo continuo con una bomba peristáltica (llamado para efectos prácticos **R1**), mientras que el otro fue alimentado en flujo intermitente (o por pulsos) usando una bomba de pecera adherida a un temporizador (llamado para efectos prácticos **R2**) como se puede observar en la Figura 29.

**Figura 29** Montaje de reactores en paralelo de la primera fase. R2 a la izquierda y R1 a la derecha



Fuente: Elaboración propia, 2010.

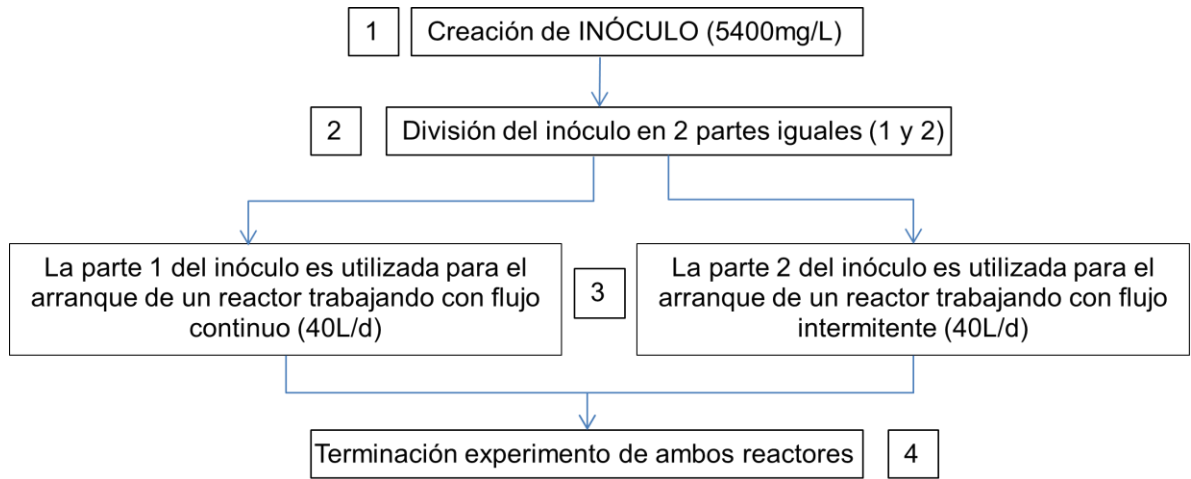
Para esta fase se programaron 30 días de experimentación, sin embargo los resultados (una gran diferencia entre los niveles de IVL para los reactores, definida por un inminente lavado de biomasa para el reactor de flujo continuo) se observaron entre los primeros 15 días de experimentos. Por lo anterior, se decidió dar por terminado la primera fase antes de los 30 días planteados inicialmente.

En el día 15, se conservó el reactor que trabajó en flujo intermitente, pues era el que presentaba mayor cantidad de biomasa, para obtención de inóculo para la segunda fase, de la misma forma en que se hizo en los inicios de la primera fase. El reactor que trabajó en flujo continuo se descartó por completo para arrancarlo de nuevo con una concentración conocida de biomasa.

#### **4.1 DIAGRAMA DE EXPERIMENTACIÓN (PRIMERA FASE)**

El diagrama de experimentación para la primera fase se encuentra esbozado en la Figura 30.

**Figura 30** Diagrama de experimentación de la primera fase



Fuente: Elaboración propia, 2010.

## 4.2 CRONOGRAMA PRIMERA FASE

El cronograma llevado a cabo para la realización de la primera fase se encuentra a continuación en la

Tabla 5.

**Tabla 5** Cronograma primera fase

PRIMERA FASE				
Nombre del reactor	Inició	Finalizó	Flujo	Cantidad de inóculo (mg SST/L)
R1	11-Jun-10	25-Jun-10	Continuo	2700
R2	11-Jun-10	25-Jun-10	Intermitente	2700

Fuente: Elaboración propia, 2011.

### 4.3 PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LOS REACTORES EN LA PRIMERA FASE

Algunos de los parámetros de diseño y operación de los reactores que se tomaron en cuenta para la primera fase, son presentados a continuación en la Tabla 6.

**Tabla 6** Parámetros de diseño y operación reactores Fase 1

Reactor	Volumen del reactor (L)	Volumen del sedimentador (L)	Área del sedimentador (cm <sup>2</sup> )	%DBO /DQO Sustrato	%SSV/ SST Reactor	Caudal de entrada (L/d)	Carga de entrada (g DQO/d)	F/M
R1	9.5	1.7	75	40%	80%	30-45	13-17	0.25-1.20
R2	9.5	1.7	75	40%	80%	30-40	13-14	0.20-0.30

Fuente: Elaboración propia, 2011.

### 4.4 PROTOCOLO DE ACCIÓN PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA PRIMERA FASE

En la Figura 31 se observa la rutina llevada a cabo diariamente en la primera fase para la recolección de los datos.

**Figura 31** Protocolo de la primera fase



- Medición de oxígeno disuelto
- Medición de pH
- Prueba de sedimentabilidad en 30 minutos
- Prueba de sólidos suspendidos totales
- Verificación del caudal
- Cambio de alimento
- Observación al microscopio de la biomasa en los reactores

Fuente: Elaboración propia, 2010.

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA SEGUNDA FASE

La segunda fase es igualmente realizada con relación a una de las hipótesis planteadas: “La cantidad de inóculo que se emplea para el arranque de reactores aerobios de mezcla completa y flujo continuo, retarda la aparición de microorganismos filamentosos”.

Para comprobar esta hipótesis, se plantea trabajar con tres reactores y con diferentes cantidades de inóculo y en flujo continuo y chequear el tiempo en el cual los reactores comienzan a presentar síntomas de Bulking filamentoso. Las concentraciones a trabajar son: 2000 mg/L, 1000 mg/L y 4000 mg/L de SST.

Conociendo la cantidad de biomasa presente en el reactor de flujo intermitente (R2, de la fase 1) se determinó el volumen a extraer para iniciar otro reactor con una concentración conocida de biomasa, utilizando la *Ecuación 2*.

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

**C<sub>1</sub>** = Concentración de biomasa presente en el R2.

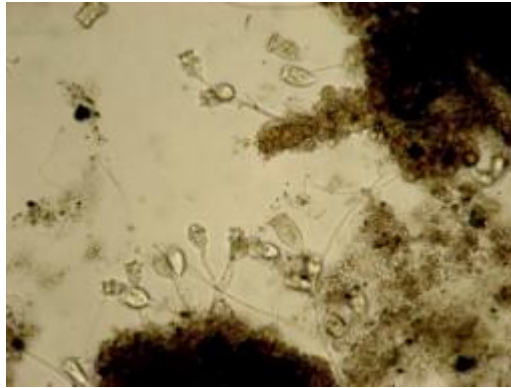
**V<sub>1</sub>** = Volumen del R2 a extraer para garantizar una concentración (C<sub>2</sub>) deseada de biomasa en el nuevo reactor.

**C<sub>2</sub>** = Concentración deseada de biomasa en el nuevo reactor, se inició aleatoriamente con 2000 mg/L de SST.

**V<sub>2</sub>** = Volumen del nuevo reactor, 10 L.

La biomasa a utilizar fue observada al microscopio para corroborar la presencia o no de filamentos y la abundancia de vorticelas y rotíferos (indicadores de la buena salud de la biomasa (55)). (Ver Figura 32).

**Figura 32** Biomasa al microscopio del inóculo empleado para arrancar el reactor con 2000 mg/L de SST de la segunda fase



Fuente: Elaboración propia, 2010.

El tiempo estimado de trabajo para cada etapa con los reactores era de 15 días pero los resultados se comenzaron a notar rápidamente, y se pretendía mantener el estado dinámico (o de arranque) por lo que cada etapa se trabajó por 7 días.

El 13 de julio del 2010 se inició la toma de datos del reactor en flujo continuo con 2000 mg/L de SST (denominado "2K"), ver Figura 33.

**Figura 33** Reactor 2K el 13 de julio de 2010



Fuente: Elaboración propia, 2010.

El 20 de julio de 2010, se da inicio al reactor con flujo continuo, con 1000 mg/L de SST (**1K**), la imagen del primer día de trabajo del reactor se observa en la Figura 34.

**Figura 34** Reactor 1K el 20 de julio de 2010



Fuente: Elaboración propia, 2010.

El 29 de Julio de 2010, la biomasa que había estado siendo inóculo para los reactores **2K** y **1K**, se convierte ahora en un reactor con flujo continuo y con 4000 mg/L de SST de inóculo y se comienza a alimentar con flujo continuo. En la Figura 35 se puede observar el día de creación del reactor con 4000mg/L de SST (**4K**).

**Figura 35** Reactor 4K el 29 de julio de 2010

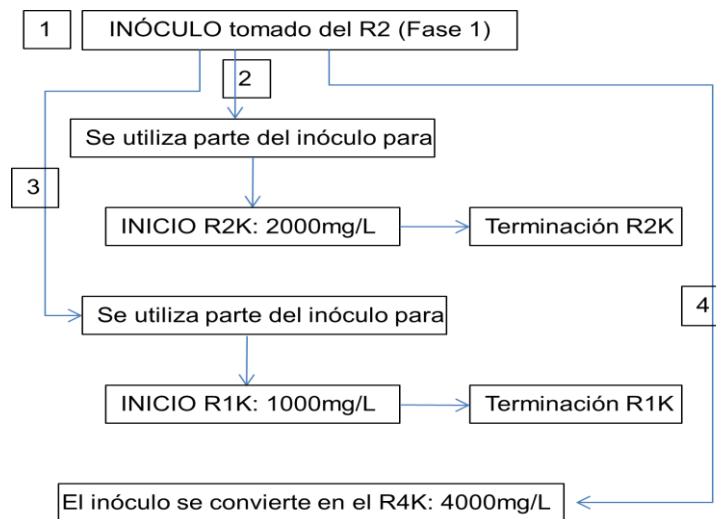


Fuente: Elaboración propia, 2010.

## 5.1 DIAGRAMA DE EXPERIMENTACIÓN (SEGUNDA FASE)

El diagrama de experimentación para la segunda fase se encuentra esbozado en la Figura 36.

**Figura 36** Diagrama de experimentación de la segunda fase



Fuente: Elaboración propia, 2010.

## 5.2. CRONOGRAMA SEGUNDA FASE

El cronograma llevado a cabo para la realización de la primera fase se encuentra a continuación en la Tabla 7.

**Tabla 7** Cronograma segunda fase

FASE 2				
Nombre del reactor	Inició	Finalizó	Flujo	Cantidad de inóculo (mg/L)
R2k	13 de Julio	20 de Julio	Continuo	2000
R1k	22 de Julio	29 de Julio	Continuo	1000
R4k	30 de Julio	6 de Agosto	Continuo	4000

Fuente: Elaboración propia, 2011.



### 5.3. PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LOS REACTORES EN LA SEGUNDA FASE

Algunos de los parámetros de diseño y operación de los reactores que se tomaron en cuenta para la primera fase, son presentados a continuación en la

**Tabla 8.**

**Tabla 8** Parámetros de diseño y operación reactores Fase 2

Reactor	Volumen del reactor (L)	Volumen del sed. (L)	Área del sed. (cm <sup>2</sup> )	%DBO/ DQO Sustrato	%SSV/ SST Reactor	Caudal de entrada (L/d)	Carga de entrada (gDQO/d)	F/M
R2K	9.5	1.7	75	40%	80%	35-45	19	0.38 - 3
R1K	9.5	1.7	75	40%	80%	35-45	2.85	0.15 - 0.30
R4K	9.5	1.7	75	40%	80%	35-45	12	0.15 - 0.30

Fuente: Elaboración propia, 2011.

### 5.4. PROTOCOLO DE ACCIÓN PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA SEGUNDA FASE

En la Figura 37 se observa la rutina llevada a cabo diariamente en la primera fase para la recolección de los datos.

**Figura 37** Protocolo de la segunda fase



- Medición de oxígeno disuelto
- Medición de pH
- Prueba de sedimentabilidad en 30 minutos
- Prueba de sólidos suspendidos totales
- Verificación del caudal
- Cambio de alimento
- Observación al microscopio de la biomasa en los reactores

Fuente: Elaboración propia, 2010.

## 6. CRONOGRAMA GENERAL DE ACTIVIDADES

En la Tabla 9 se presenta el cronograma general de actividades llevado a cabo a lo largo del proceso de investigación.

**Tabla 9** Cronograma general de actividades

Fase	Actividad	Período		Tiempo presupuestado	Tiempo utilizado
		Inició	Finalizó		
1	Búsqueda de información acerca de proyectos de investigación relacionados con bioreactores y bulking filamentoso	Agosto de 2009	Abril de 2010	6 meses	8 meses
	Gestión de materiales y espacio para llevar a cabo el proyecto	Marzo de 2010	Julio de 2010	1-2 meses	4 meses
2	Puesta en marcha de la <b>primera fase</b> del experimento (laboratorio)	11 de Junio de 2010	25 de Junio de 2010	1 mes	15 días
	Puesta en marcha de la <b>segunda fase</b> del experimento (laboratorio)	13 de Julio de 2010	6 de Agosto de 2010	3 meses	23 días
3	Documentación de los datos recolectados en laboratorio	10 de Agosto de 2010	10 de Enero de 2010	6 meses	5 meses
4	Entrega oficial para ser evaluada por los jurados	19 de Enero de 2010			

## 7. PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN

El presupuesto para llevar a cabo la investigación fue patrocinado en su mayoría por el laboratorio de la Universidad de Medellín. El informe detallado de costos se presenta a continuación en la Tabla 10.

**Tabla 10** Presupuesto del proyecto

<b>PRESUPUESTO DEL PROYECTO</b>			
<b>Recursos humanos</b>			
Juan David López (Investigador)			
Liz Arango Muñoz (Investigador)			
Carlos Alberto Sierra (Asesor)			
Juan David Correa (Asesor)			
<b>Equipos</b>			
<i>Ítem</i>	<i>Tiempo de uso</i>	<i>Costo</i>	<i>Pagado por</i>
Computador	2 meses	\$ 200.000,00	Investigadores
Medidor de pH	1 hora/semana	\$ 5.000,00	Investigadores
Medidor de Oxígeno	1 hora/semana	\$ 5.000,00	Investigadores
Balanza Analítica	40 min/semana	\$ 3.336,00	Investigadores
Microscopio	1 hora/semana	\$ 1.600,00	Investigadores
Bomba peristáltica	8 semanas	\$ 280.000,00	Investigadores
Agitador magnético	6 días	\$ 3.000,00	Investigadores
<b>Insumos</b>			
<i>Insumos</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo</i>	<i>Pagado por</i>
<i>Reactores de acrílico</i>	2	\$ 250.000,00	<i>Investigadores</i>
Beaker 200mL	2	\$ 16.000,00	Laboratorio UdeM
Beaker 1L	1	\$ 12.400,00	Laboratorio UdeM
Filtros para sólidos	50	\$ 50.000,00	Laboratorio UdeM
Magnetos	1	\$ 11.700,00	Laboratorio UdeM
Cubreobjetos	1	\$ 3.200,00	Laboratorio UdeM
Probeta de 1L	2	\$ 156.000,00	Laboratorio UdeM
Mortero	1	\$ 0,00	Laboratorio UdeM
Pipeta	5	\$ 56.000,00	Laboratorio UdeM
Pera de succión	1	\$ 27.500,00	Laboratorio UdeM

Probeta de 100mL	3	\$ 117.000,00	Laboratorio UdeM
Cápsula de porcelana	4	\$ 120.000,00	Laboratorio UdeM
Espátulas	3	\$ 45.000,00	Laboratorio UdeM
Frasco lavador	1	\$ 5.520,00	Laboratorio UdeM
<b>Reactivos</b>			
Reactivos	Cantidad	Costo	Pagado por
Solución jabonosa	500mL	\$ 4.375,00	Laboratorio UdeM
Jabón yodado	500mL	\$ 6.200,00	Laboratorio UdeM
Sulfato ferroso	10g	\$ 15.200,00	Laboratorio UdeM
Cloruro de cobalto	0.3g	\$ 0,00	Laboratorio UdeM
Cloruro de hierro	5g	\$ 2.500,00	Laboratorio UdeM
Cloruro de Manganeso	0.1g	\$ 500,00	Laboratorio UdeM
Cloruro de Zinc	0.03g	\$ 800,00	Laboratorio UdeM
Molibdato de Sodio	0.01g	\$ 600,00	Laboratorio UdeM
Cloruro de Cobre	0.01g	\$ 500,00	Laboratorio UdeM
Cloruro de calcio	15g	\$ 2.200,00	Laboratorio UdeM
Sulfato de Sodio	30g	\$ 17.000,00	Laboratorio UdeM
Fosfato diácido potasio	50g	\$ 7.875,00	Laboratorio UdeM
<b>Servicios</b>			
Servicios	Tipo de servicio	Costo	Pagado por
Análisis de laboratorio	DBO	\$30.000,00	Laboratorio UdeM
Análisis de laboratorio	DQO	\$25.000,00	Laboratorio UdeM
Análisis de laboratorio	Fosforo total	\$15.000,00	Laboratorio UdeM
Análisis de laboratorio	NT	\$15.000,00	Laboratorio UdeM
Análisis de laboratorio	DQO filtrada	\$30.000,00	Laboratorio UdeM
Análisis de laboratorio	Aceites y grasas	\$25.000,00	Laboratorio UdeM
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 1.366.006,00</b>	



## CAPÍTULO IV

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 1.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PRIMERA FASE

Para la primera fase se trabajaron dos reactores, uno de ellos se alimentó en régimen intermitente y el otro en régimen continuo. Para efectos prácticos en la presentación de resultados, se le asignó un nombre corto y distintivo a cada uno de estos reactores, ver Tabla 11.

**Tabla 11** Abreviaciones para los reactores de la primera fase

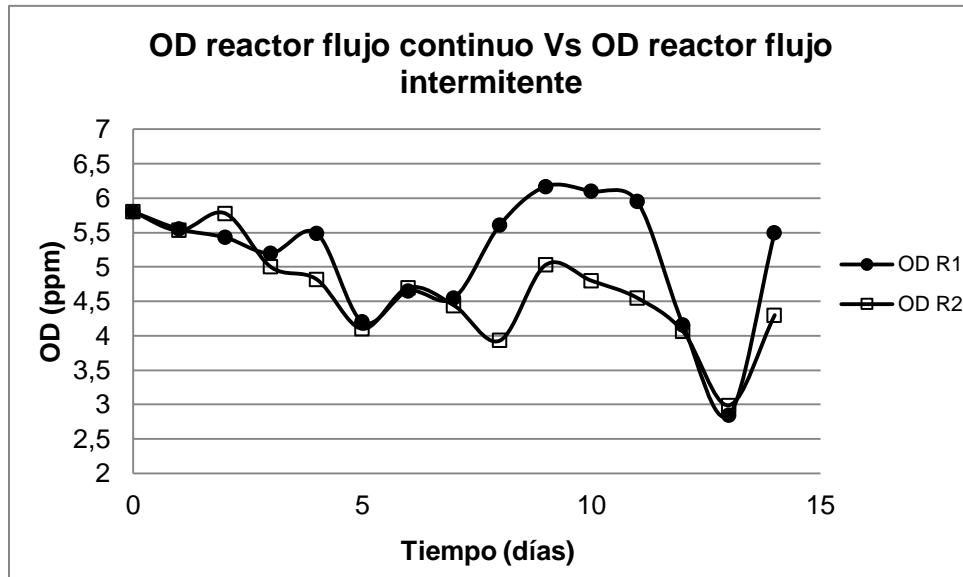
Reactor con flujo continuo	<b>R1</b>
Reactor con flujo intermitente	<b>R2</b>

Fuente: Elaboración propia, 2011.

**1.1.1 Variables independientes.** Las variables independientes son aquellas que no se intervienen en el laboratorio ni se controlan para mantenerlas en ciertos rangos o niveles, éstas variables por el contrario responden a las condiciones presentadas a lo largo del trabajo en el laboratorio. En el experimento sólo se cuenta con una variable independiente, el oxígeno disuelto, pues éste cambia con respecto a la cantidad de microorganismos, el caudal de aire suministrado, entre otras.

- El comportamiento del oxígeno disuelto de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 38.

**Figura 38** Oxígeno Disuelto de los reactores R1 y R2



El oxígeno disuelto en el día cero para ambos reactores corresponde a 5.8 ppm (Ver Figura 38), valor registrado en el recipiente donde se creó la biomasa. A partir de este punto se observa cómo el oxígeno disuelto del reactor de flujo intermitente adquiere valores más bajos que los registrados para el reactor de flujo continuo. Lo anterior puede explicarse desde el punto de vista de los SST (o SSV) de los reactores, pues estos están directamente ligados a la biomasa que utiliza el OD para hacer uso del sustrato, y bien puede notarse que hay un mayor consumo de OD para el R2 y que además presenta mayor cantidad de SST que el R1.

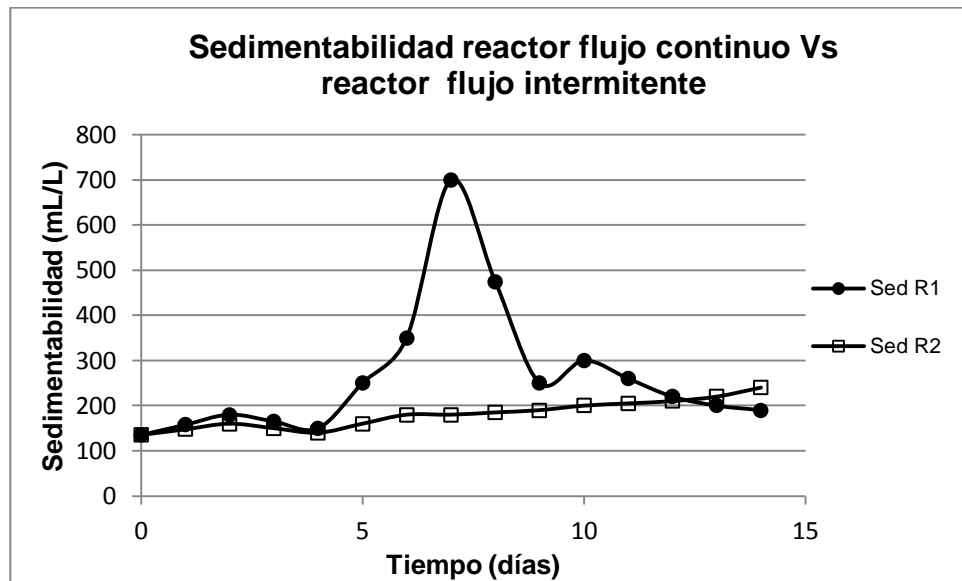
Otra posible explicación a estas diferencias en los niveles de OD podría radicar en el patrón de alimentación, pues según estudios como los de Houtmeyers y sus colaboradores (52) el flujo intermitente induce una mayor tasa de captación de sustrato y de oxígeno.

**1.1.2 Variables dependientes.** Las variables dependientes son aquellas que se ven afectadas por el funcionamiento, el control y el manejo de otras variables. Estas variables incluyen los sólidos suspendidos totales (SST), la

sedimentabilidad en 30 minutos, el índice volumétrico de lodos (IVL), la relación F/M y la edad de lodos.

- El comportamiento de la sedimentabilidad de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 39.

**Figura 39** Sedimentabilidad de los reactores R1 y R2



La sedimentabilidad al igual que el OD y el resto de variables a continuación descritas, adquiere su valor del día cero, en el recipiente donde se creó la biomasa. Este primer valor representa una biomasa de buena sedimentabilidad, como luego se corroborará con el Índice Volumétrico de Lodos. A partir del cuarto día la sedimentabilidad de ambos reactores empieza a diferenciarse, mostrando una pérdida de la capacidad de sedimentación el R1, ver Figura 39.

Resulta curioso, que el R1 en el día séptimo presenta el valor más alto de sedimentabilidad (700 mL/L), y que a partir de allí empieza a disminuir (mejorar) pero si se compara con la gráfica de SST se verá que los sólidos empiezan a perderse drásticamente a partir de ese mismo día, el IVL crece, y que incluso los niveles de OD suben, lo que lleva a concluir que la sedimentabilidad mejora por cuanto se pierde buena parte de la biomasa.

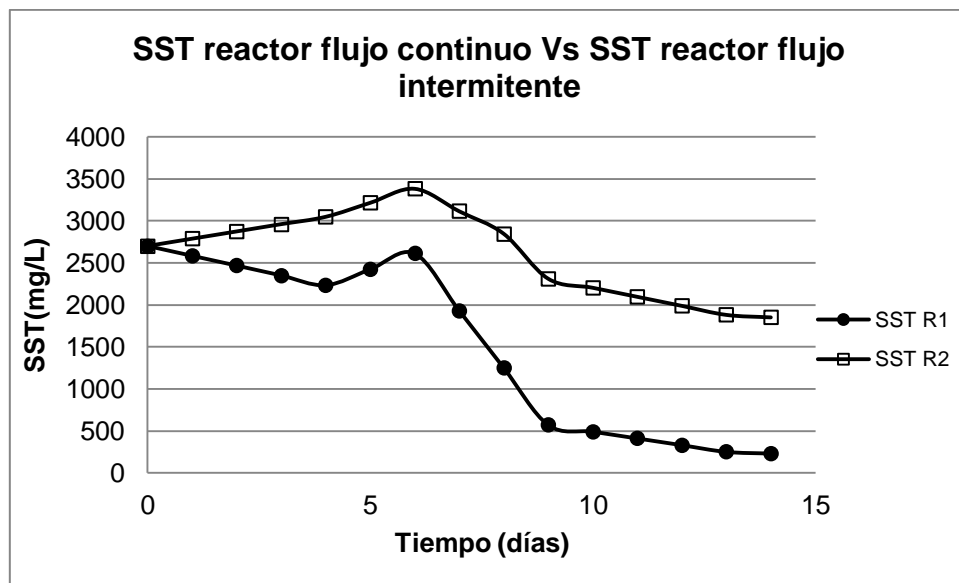
La sedimentabilidad en el R2 también tuvo un comportamiento ligeramente ascendente hasta su pico en 240 mL/L, lo cual podría explicarse desde los tiempos de inanición y alimentación manejados con el temporizador, pues al relacionar variables como el IVL con el volumen de ARS que recibió el reactor (periodo de alimentación, o “*feast period*”), y con el tiempo de inanición (“*famine period*”) se encuentran buenas correlaciones. El volumen de ARS que recibe el



reactor parece explicar con un 88% de certeza la variabilidad del IVL, la relación es positiva (el IVL crece a medida que crece este volumen en periodo de alimentación), se ajusta a una ecuación exponencial, y el valor de  $P^*$  (*P-value*) es inferior a 0,05 (0,0374). Lo mismo ocurre cuando se correlacionan los minutos de inanición (minutos programados con el temporizador para que la bomba de alimentación estuviese apagada) con el IVL; la certeza es del 89%, la relación es positiva (el IVL crece a medida que crece el periodo de inanición), se ajusta a una ecuación exponencial y se tiene el mismo valor de P que en el caso anterior.

- El comportamiento de los sólidos suspendidos totales de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 40

**Figura 40** Sólidos Suspendidos Totales de los reactores R1 y R2



Los Sólidos Suspendidos Totales inician en el día cero con el mismo valor para ambos reactores, pero a partir del día 1 empiezan a diferenciarse, ver Figura 40. El R1 parece tener un efecto de lavado, entre el día 0 y 4, que podría atribuirse más a efectos hidráulicos por el tipo de alimentación que a un fenómeno de bulking. Lo anterior se deduce según la Figura 41 de IVL para el R1, que muestra una serie de valores normales (100 – 150 g/mL) hasta el día 5, y a partir de ahí

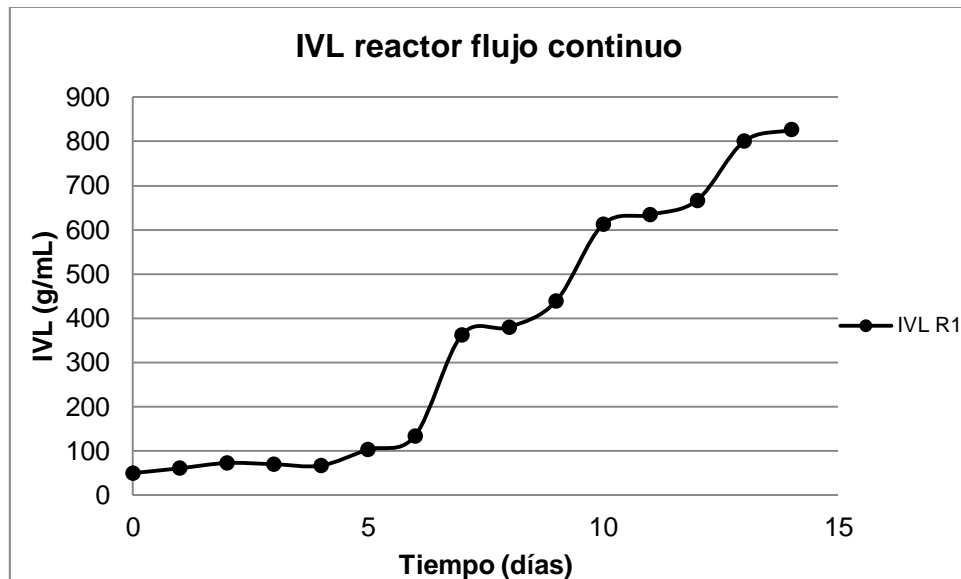
\* Valor P; término estadístico. Establece si la diferencia que se encuentra entre grupos bajo comparación se debe al azar. Un valor de P alto significa que hay una alta probabilidad de que los resultados obtenidos se deban solamente a la casualidad. Un valor de P bajo significa que hay buenas posibilidad de que los resultados obtenidos se deban a factores ajenos a la casualidad o al azar.

empieza a crecer el IVL, a partir de ese mismo día, en la gráfica de SST, se nota una enorme pérdida de biomasa.

El R2 muestra un incremento en SST durante los primeros 6 días, y a partir de ahí se nota una ligera pérdida de biomasa, acompañada de una ligera desmejora del IVL, por lo que podría descartarse un lavado por bajo TRH en etapa de alimentación.

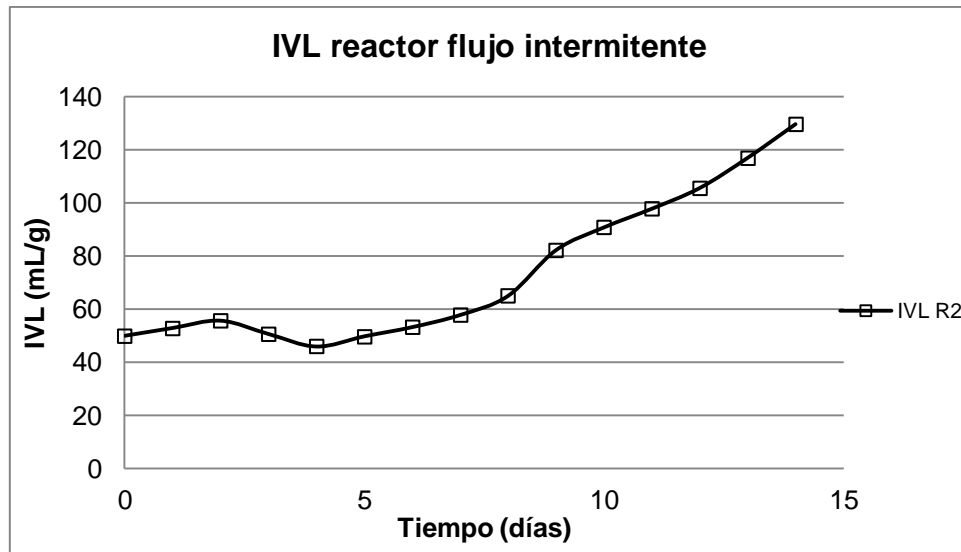
- El comportamiento del IVL del reactor flujo continuo en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 41.

**Figura 41** Índice volumétrico de lodos del reactor R1



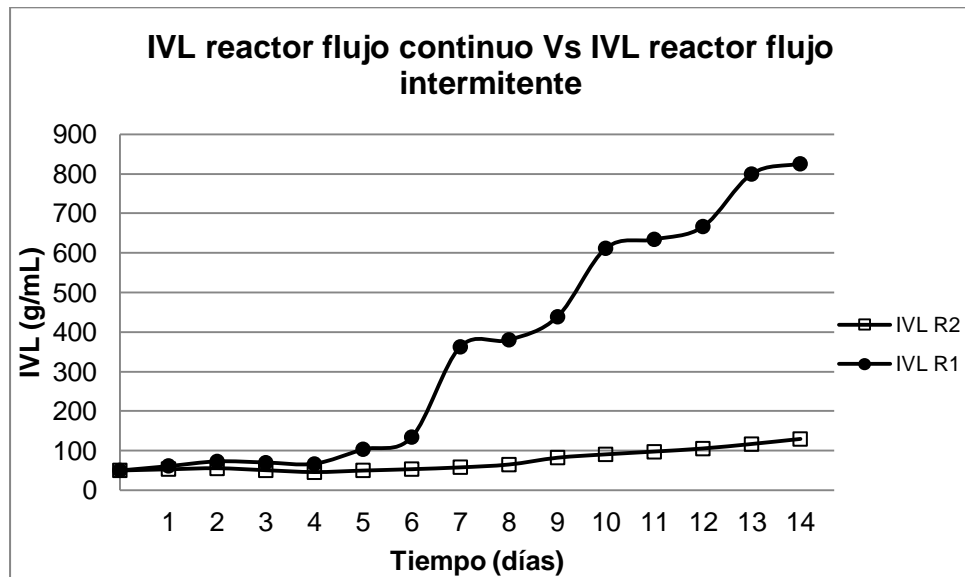
- El comportamiento del IVL del reactor flujo intermitente en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 42.

**Figura 42** Índice volumétrico de lodos del reactor R2



- El comportamiento del IVL de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 43.

**Figura 43** Índice volumétrico de lodos de los reactores R1 y R2



Cuando se observa la gráfica del IVL que muestra la evolución del IVL de los reactores en el tiempo, ver Figura 43, se nota una gran desmejora del IVL para el R1, pero un leve deterioro del IVL para el R2. Sin embargo, cuando se observa la Figura 42, que detalla únicamente la evolución del IVL del R2 en el tiempo, se nota cómo pasa de 50 mL/g a 130 mL/g, y esboza un grado de hinchamiento de los lodos.

Para el R1, el IVL empieza a crecer rápidamente desde el día seis, mismo día que coincide con una pérdida de biomasa, una pérdida de buena sedimentabilidad, y un aumento de OD. En el caso del R2, se tienen dos incrementos del IVL, desde el día cinco y desde el día nueve.

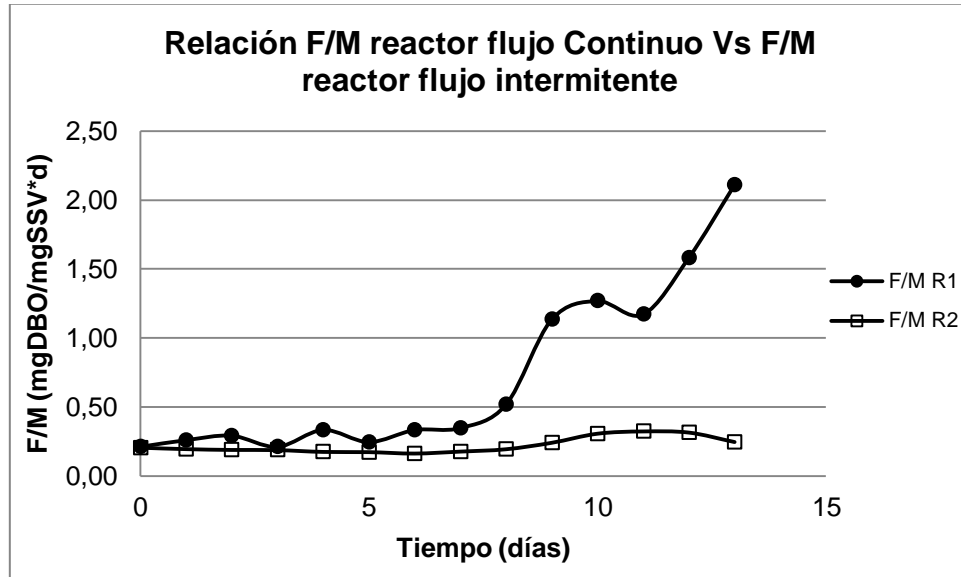
Como se mencionó anteriormente, el incremento en el valor del IVL del R1 está ligado directamente al valor de SST del mismo reactor, factores que parecen entonces estar relacionados con el tipo de flujo de alimentación. Durante los 15 días de experimentación no se varió ni el caudal ni la cantidad de alimento por tanto la carga al reactor permaneció intacta. Sin embargo, al no haber mayor control sobre el inventario de lodos, y con la pérdida de biomasa en el efluente por la mala sedimentabilidad, se sabe que existió un incremento constante en la relación F/M para ambos reactores pero de forma más marcada en el R1 (por presentar un mayor fenómeno de lavado de biomasa).

Parece obvio entonces como las diferencias de flujo entre el R1 y R2 definen los comportamientos del IVL, por lo menos, para las condiciones bajo las que se trabajó. Resulta particular cómo antes de iniciar ambos reactores, la biomasa alimentada por tandas, presentaba buena sedimentabilidad, y a partir del cuarto día comienzan a diferenciarse notoriamente los valores de IVL para los reactores, mostrando niveles más apropiados bajo flujo intermitente, tal y como se observa en los trabajos de Houtmeyers y colaboradores (52) que también siguen y analizan el comportamiento de los valores de IVL para dos reactores alimentados con distintos regímenes de flujo.

En el caso del R2, el leve incremento en el IVL puede explicarse por la variación en los tiempos de alimentación e inanición programados con el temporizador. El tiempo de alimentación fue incrementándose paulatinamente, junto con el tiempo de inanición, para mantener un mismo caudal durante todos los días de experimentación. Probablemente el incremento en los tiempos de inanición afectó de forma más severa a las bacterias formadoras de floc que a las filamentosas, como lo menciona Sykes (1989) donde afirma que las bacterias filamentosas tienen una mayor resistencia a la inanición que las bacterias formadoras de floc. Esta teoría parece apoyar perfectamente otros estudios como los de Beccari, Martins y sus colaboradores (56) donde se afirma que algunas bacterias causantes del bulking filamentoso pueden tener una capacidad similar o mayor de almacenamiento de sustrato que las bacterias formadoras de floc.

- El comportamiento de la relación F/M de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 44

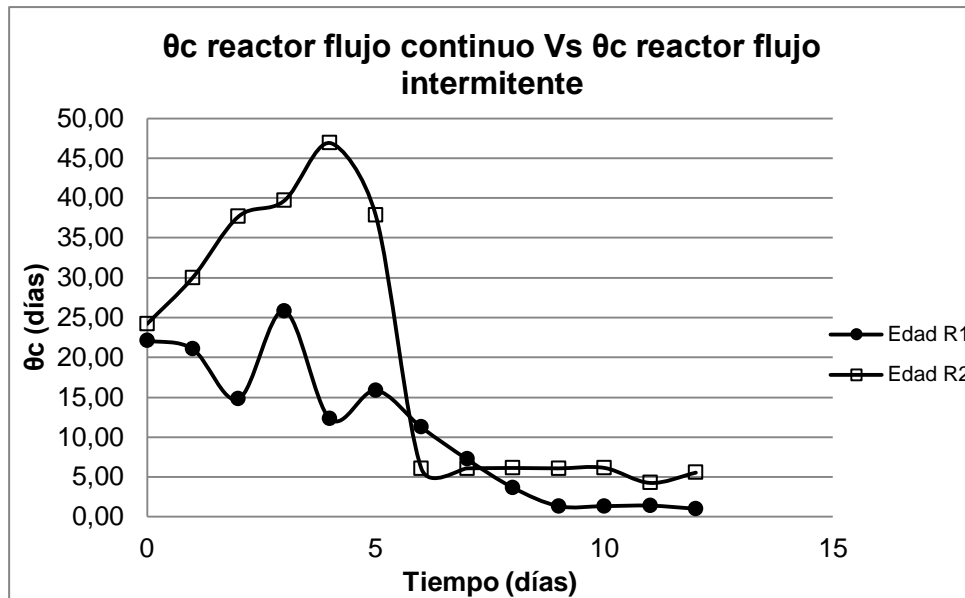
**Figura 44** Relación F/M de los reactores R1 y R2



La relación F/M de ambos reactores se mantiene más o menos constante hasta el día ocho, ver Figura 44, donde tras el lavado de la biomasa del R1, la relación F/M para ese reactor se incrementa; al mantenerse constante el alimento “F” y disminuirse la biomasa “M”. En el día 12, la relación F/M del R1 tiene un descenso, como si se tratase de un incremento de los SST pero puede comprobarse que este no es el caso. Puede tratarse más bien de algún problema con la bomba peristáltica y la dosificación del sustrato, que por taponamiento en la manguera, o por movimiento de la misma en el cabezal que hace que el caudal baje.

- El comportamiento de la edades de lodos de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 45.

**Figura 45** Edad de lodos de los reactores R1 y R2



La edad de lodos de los reactores, aunque se calculó y se graficó, ver Figura 45, jamás se usó como parámetro de control. Esto explica las grandes fluctuaciones en los valores al no existir una purga programada.

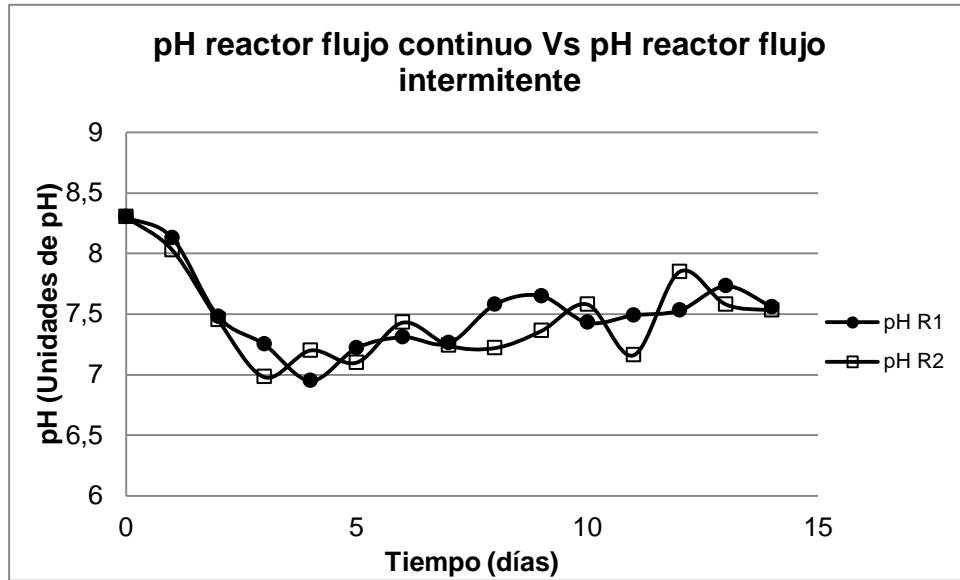
Algunos autores, como Gerardi (57) mencionan la edad de lodos como un factor determinante en la floculación y la sedimentabilidad, de forma que edades de lodo demasiado bajas (por debajo de tres días) promueven un floc de malas características de sedimentabilidad, débil y fácil de ser arrastrado en el efluente. Esto pudo haberle ocurrido a la biomasa del R1 a partir del séptimo día, donde la edad de lodos cae por debajo de los cinco días, junto con el crecimiento excesivo de filamentos, y el incremento exagerado de la relación F/M, parecieran las condiciones más desfavorables para un reactor de mezcla completa.

El comportamiento de la edad de los lodos del R2, tiene un gran pico durante los cinco primeros días del experimento, que puede explicarse con el incremento que tuvo este reactor en los valores de SST en ese mismo lapso. A partir de allí tiene un descenso y se mantiene alrededor de los cinco días de edad de lodos, gracias a una purga que se le programa a este reactor. Se decide no purgar de la misma forma al R1 por la gran pérdida de SST que presenta.

**1.1.3 Variables fijas.** Las variables fijas son aquellas variables que se manipulan a lo largo del proceso para que se mantengan en un rango constante, estas son el pH, el caudal y el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).

- El comportamiento del pH de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 46

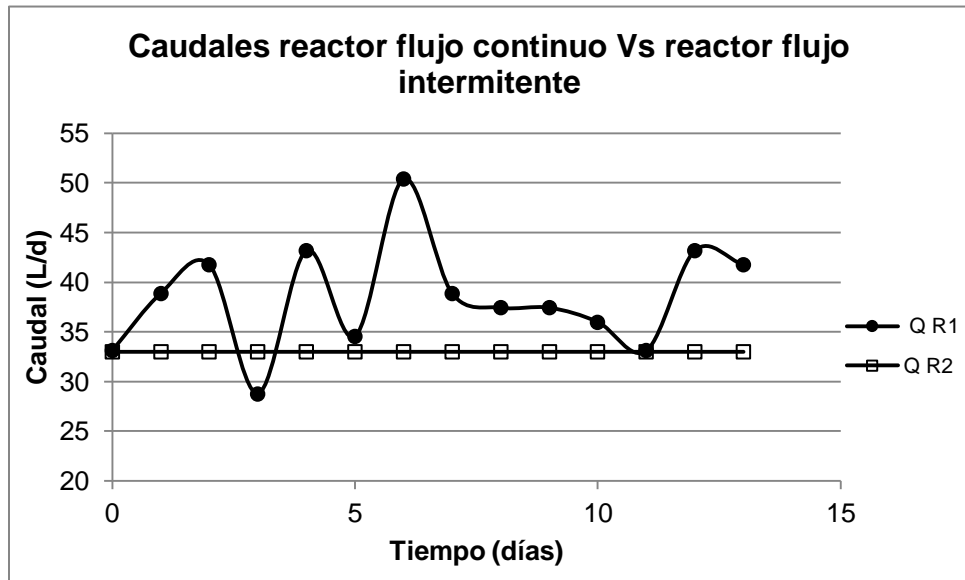
**Figura 46** pH de los reactores R1y R2



Los valores de pH logran mantenerse entre el rango óptimo recomendado por la literatura (7 – 8 unidades de pH), ver Figura 46. Con esto se puede descartar cualquier presencia de hongo filamentososo como causante del fenómeno de hinchamiento en el R1 o como el responsable del ligero incremento en el IVL del R2.

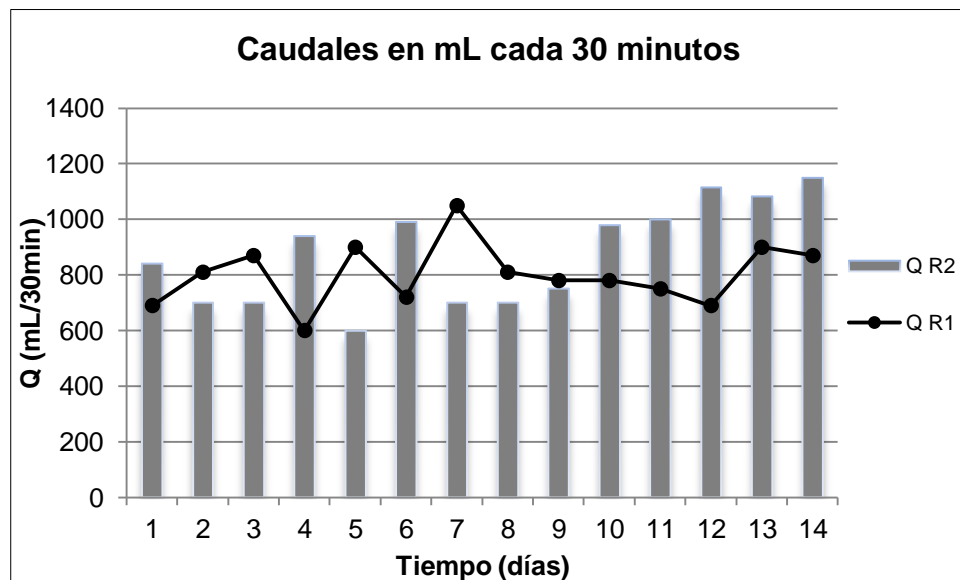
- El comportamiento del caudal de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la Figura 47

Figura 47 Caudal de los reactores R1 y R2



- Caudales de los reactores R1 y R2 presentados en mL cada 30 minutos son presentados a continuación en la Figura 48

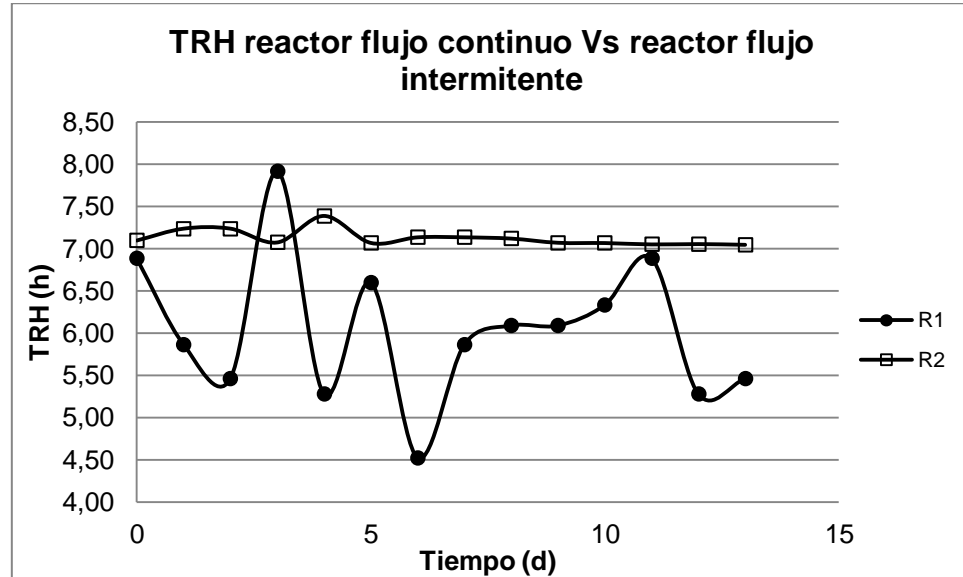
Figura 48 Caudales de los reactores R1 y R2





- El comportamiento del TRH de los dos reactores en el tiempo se presenta a continuación en la
- Figura 49.

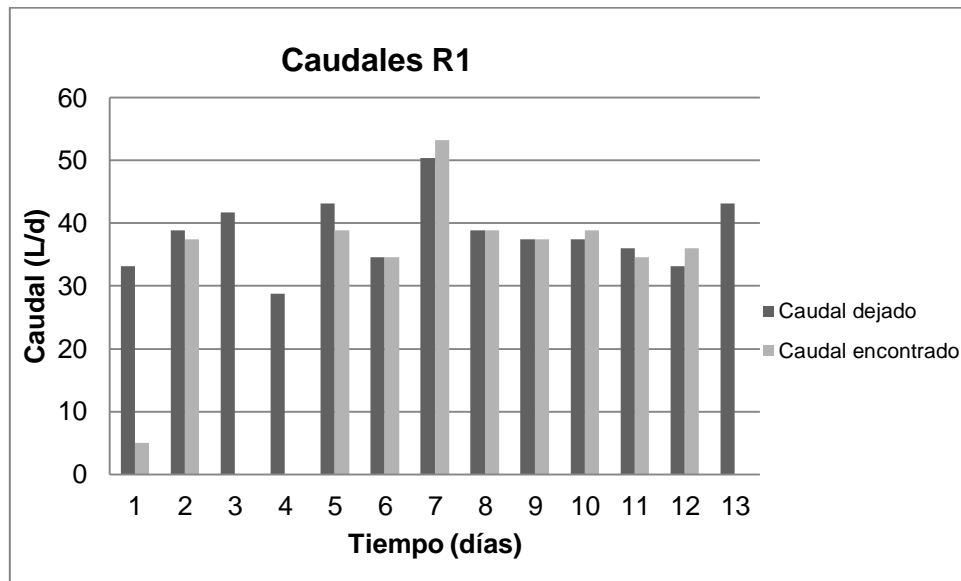
**Figura 49** Tiempo de retención hidráulico reactores 1 y 2



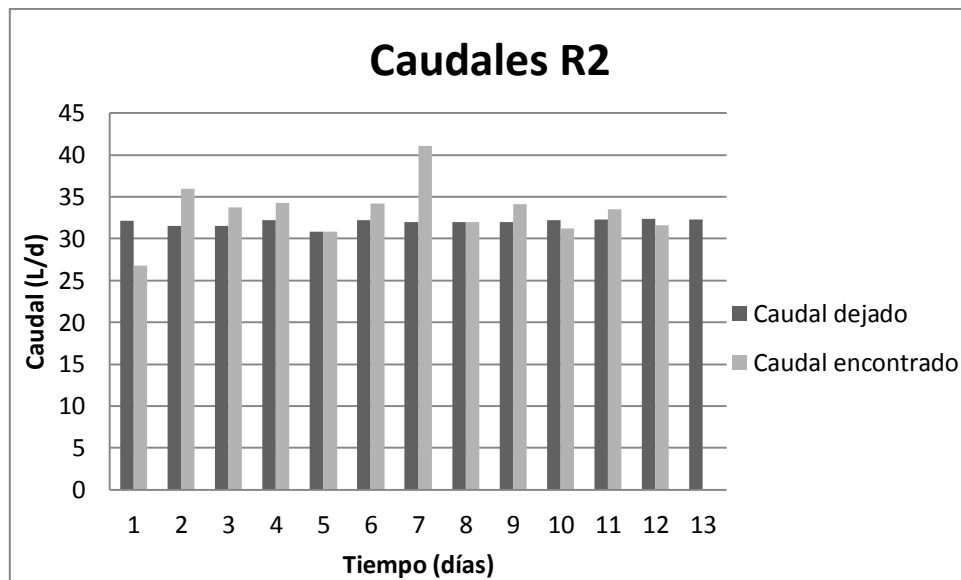
Si se observa el comportamiento del caudal de los reactores en el tiempo, ver Figura 47, se nota cómo el R2 presenta un flujo uniforme durante los días de experimentación, sin embargo el caudal del R1 muestra picos que son atribuidos a la bomba peristáltica con la que se trabajó.

Si se analizan los caudales de cada reactor por separado, mostrando los caudales de dosificación con los que se dejó operando a comparación con los caudales encontrados al día siguiente, Ver Figura 50 y Figura 51. Se nota una gran diferencia entre la utilización de la bomba peristáltica frente a la utilización de la bomba de pecera con temporizador. Para el R1 existieron al menos dos días (tercero y cuarto) en que se encontró la bomba dosificando aire (probablemente por el diámetro de manguera utilizada se salía ésta con facilidad del cabezal de la bomba, provocando una falsa succión de ARS) y un día donde existió una diferencia de más de 20 litros por día en el caudal dejado y encontrado.

**Figura 50** Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente con la bomba peristáltica



**Figura 51** Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente con la bomba de pecera adherida al temporizador



Para el caso del R2 se tienen minúsculas diferencias entre el caudal dejado y encontrado al día siguiente, mostrando como el mayor pico el día siete donde se

encontró un caudal casi 10 litros por día mayor al caudal con el que se dejó operando la bomba.

El TRH se muestra como el inverso del caudal con dos picos notorios entre los días dos y seis para el R1. Pero en el caso del R2, como con el caudal, muestra un TRH estable alrededor de siete horas. (Ver Figura 47 y

Figura 49)

**1.1.4 Variables cualitativas.** Las variables cualitativas permiten observar características del reactor como la vida microbiana presente y el aspecto físico (color, olor, textura) a simple vista del reactor por medio de fotos. Estas variables son fotos al microscopio de la biomasa en los reactores, fotos de los reactores en el tiempo y de algunas pruebas de sedimentabilidad. (Ver Figura 52 y Figura 53)

Las observaciones al microscopio de la biomasa del reactor R1, (ver Figura 52 y Figura 53) muestran una rápida pérdida de floc de buen tamaño, y un crecimiento exagerado de filamentos que emergen de los pocos floc que quedan. Se pierden algunas especies, como las vorticelas, protozoos ciliados sésiles, que durante los primeros días de experimentación se vieron adheridas al floc. Al tiempo aparecen otras especies como algunos protozoos flagelados y amebas, indicadores de una F/M alta, asociado al lavado de la biomasa y a la cantidad de comida disponible para los microorganismos.

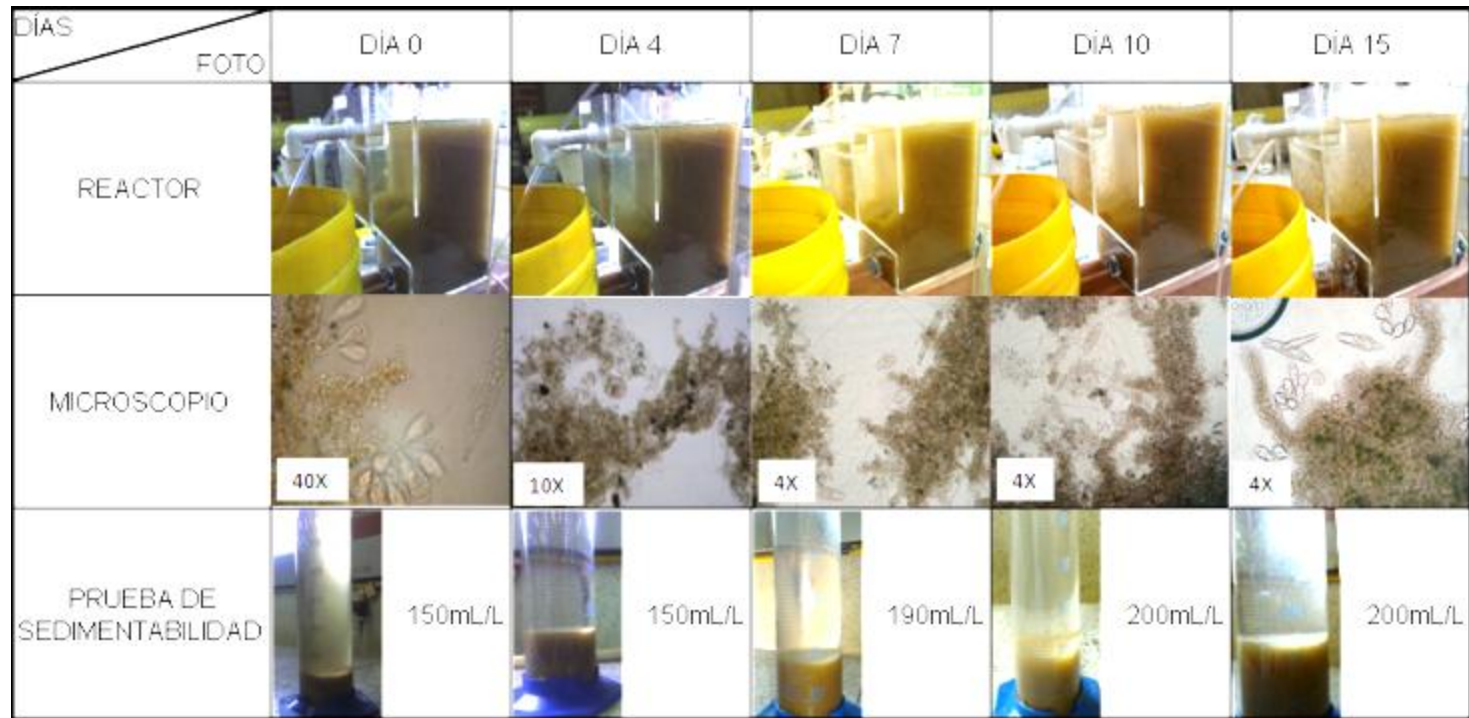
Para el R2, si bien también se nota un crecimiento de filamentos, algunos extendiéndose por fuera del floc, sigue habiendo buena cantidad de floc y microorganismos asociados a ellos. Además de las vorticelas se encuentra buena cantidad de rotíferos, metazoos indicadores de ausencia de tóxicos en el afluente, una buena cantidad de OD, y una edad de lodos alta.

Se recomienda al lector referirse al Anexo #1 para visualizar de manera más detallada lo sucedido con los reactores a nivel microbiológico.

**Figura 52** Seguimiento fotográfico al reactor 1

DÍAS	FOTO	DÍA 0	DÍA 4	DÍA 7	DÍA 10	DÍA 15
REACTOR						
MICROSCOPIO		 40X	 10X	 4X	 4X	 4X
PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD		 150 mL/L	 150 mL/L	 340 mL/L	 260 mL/L	 190 mL/L

**Figura 53** Seguimiento fotográfico al reactor 2



## 1.2 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SEGUNDA FASE

Para la segunda fase se trabajaron tres reactores con diferentes cantidades de inóculo, uno de ellos trabajó con 2000mg/L, el siguiente trabajó con 1000mg/L y el último de ellos con 4000mg/L de inóculo. Para efectos prácticos a la hora de presentar los resultados, se le asignó un nombre corto a cada uno de estos reactores, ver Tabla 12

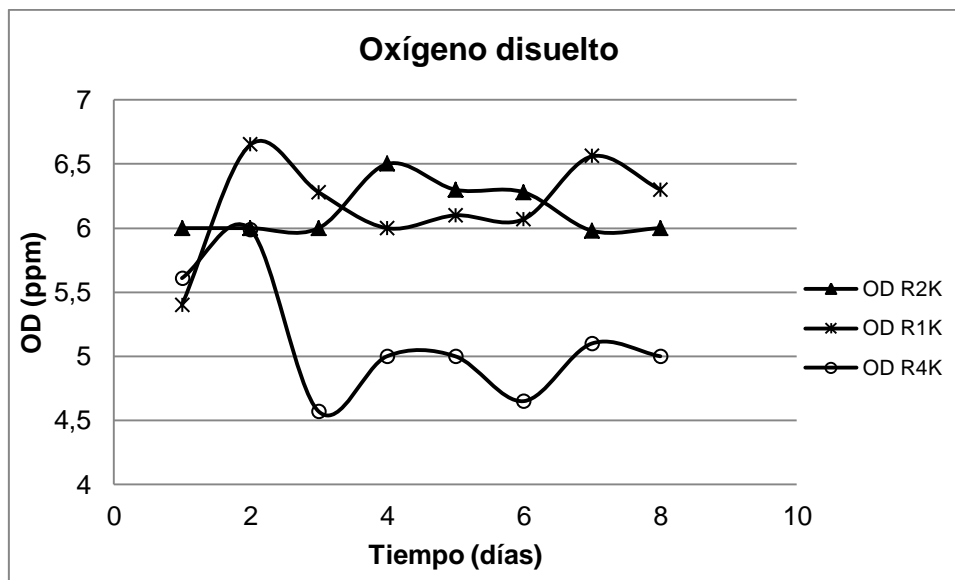
**Tabla 12** Abreviaciones para los reactores de la segunda fase

Reactor con 2000mg/L de inóculo	R2K
Reactor con 1000mg/L de inóculo	R1K
Reactor con 4000mg/L de inóculo	R4K

**1.2.1 Variables independientes.** Como variable independiente, igual que en la fase uno se tiene el oxígeno disuelto.

- El comportamiento del oxígeno disuelto de los tres reactores en el tiempo es presentado a continuación en la Figura 54.

**Figura 54** Oxígeno disuelto reactores R2K, R1K y R4K

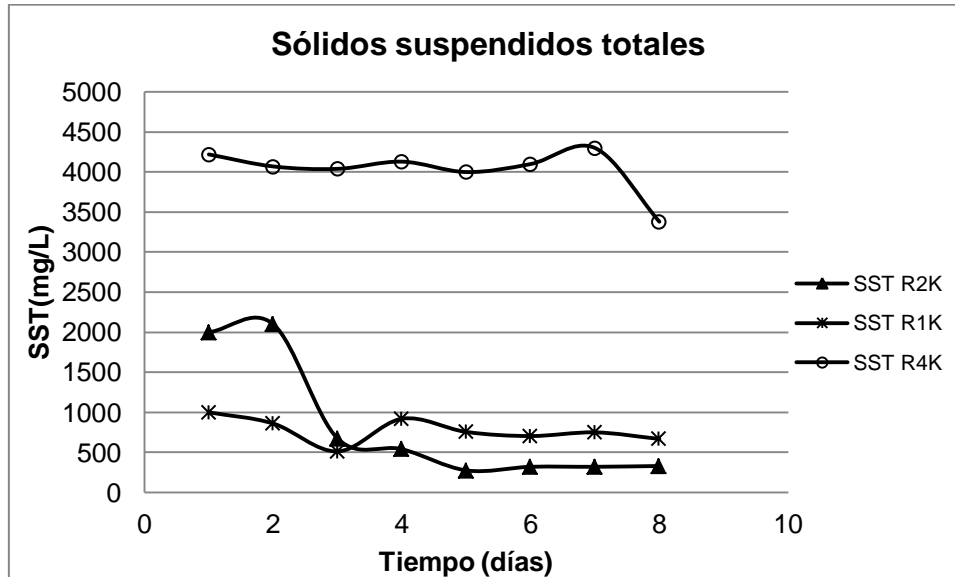


El OD parece responder a la concentración de SST en los reactores. Así, el reactor con mayor cantidad de SST, el R4K que inició con 4000 mg/L de SST, muestra los valores más bajos de OD, comparado con los otros dos reactores, seguramente por la presencia de una mayor cantidad de biomasa. En el caso de los otros dos reactores, si bien pareciera que no se cumple esto, en realidad es porque el R2K pierde biomasa a partir del segundo día y queda el R1K con mayor cantidad, de ahí que muestre un poco más de consumo de OD.

**1.2.2 Variables dependientes.** Las variables dependientes para la fase 2 son las mismas que las variables para la fase 1, estas son, los sólidos suspendidos totales (SST), la sedimentabilidad en 30 minutos, el índice volumétrico de lodos (IVL), la relación F/M y la edad de lodos.

- El comportamiento de los SST de los tres reactores en el tiempo es presentado a continuación en la Figura 55.

**Figura 55** SST de los reactores R2K, R1K y R4K



Los tres reactores se inician con concentraciones de SST al azar, empezando con el reactor R2K, de 2000 mg/L de inóculo. Tras los resultados de la primera fase, se opta por iniciar una purga programada a este reactor, desde el día dos, cuando se observa un crecimiento en la cantidad de SST. Sin embargo, las condiciones

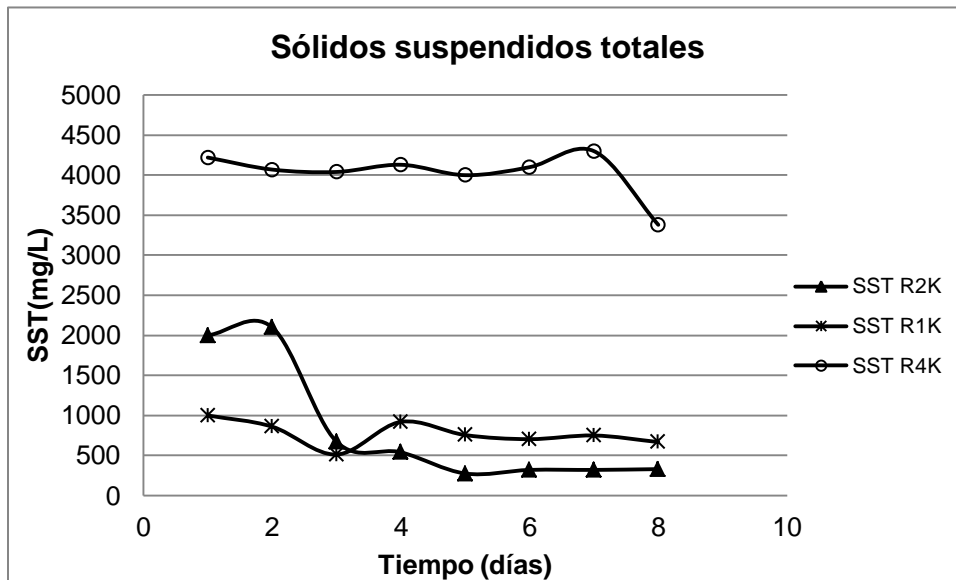
parecen ser desfavorables porque a pesar de la poca cantidad de biomasa (por debajo de 500 mg/L luego del tercer día) la sedimentabilidad es pobre (por encima de 800 mL/L). Esto puede llevar a pensar en un serio lavado del reactor y a un serio problema de bulking por el alto IVL.

Luego de lo ocurrido con el reactor R2K se decide no purgar los siguientes dos reactores. Se sigue con el R1K, que parece tener un comportamiento más estable en el tiempo de los SST. Esto, junto con la sedimentabilidad, el IVL y las observaciones al microscopio, demuestran que es el reactor con menor desarrollo de bulking filamentoso.

Los SST del R4K también tienen un buen comportamiento durante los días de experimentación, excepto en el día séptimo donde parece existir cierto lavado de la biomasa en el efluente. Lastimosamente, los días de experimentación no pudieron extenderse para observar la evolución del valor de los SST para este reactor.

- El comportamiento de la sedimentabilidad de los tres reactores en el tiempo es presentada a continuación en la Figura 56.

**Figura 56** Sedimentabilidad de los reactores R2K, R1K y R4K.



Como se mencionaba anteriormente, el R1K es quien presenta el mejor comportamiento de sedimentabilidad frente a los otros dos reactores, ver Figura 56



El R4K no parece sufrir efecto de lavado por el deterioro de su sedimentabilidad, pues si bien ésta empeora en el transcurso del experimento, los SST del reactor se mantienen más o menos constantes hasta el séptimo día.

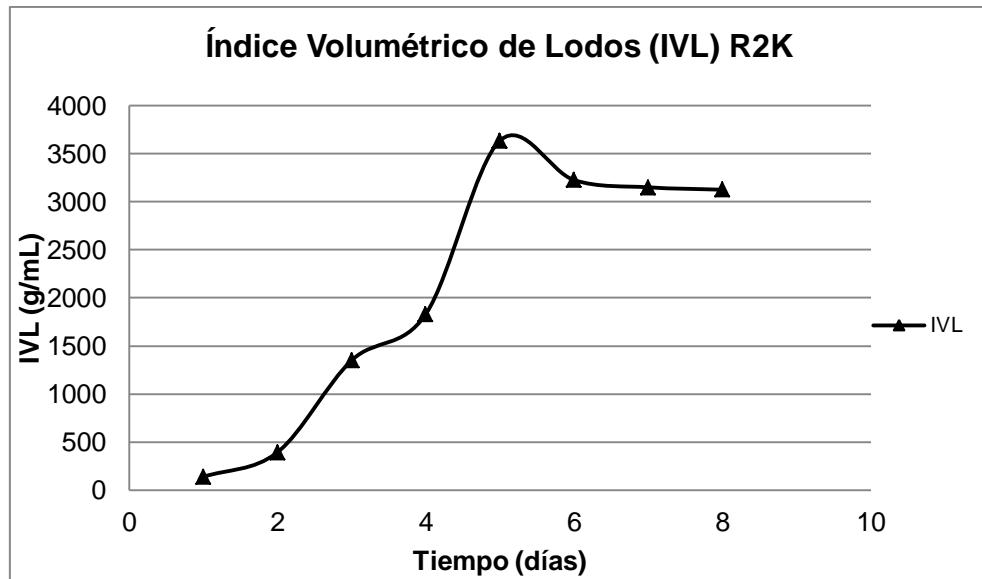
El R2K inicia con lo que parece una mala sedimentabilidad (278 mL/L), confundándose con un principio de bulking, pero el chequeo del valor del IVL muestra un lodo de mejores características de sedimentabilidad incluso que el R1K, sin embargo, en el tiempo el deterioro de este parámetro es visible y se corrobora con las observaciones al microscopio que muestran gran cantidad de filamentos.

La empresa americana *Environmental Leverage* recomienda correr la prueba de sedimentabilidad al 50%, es decir 50% agua de la llave o efluente y 50% de lodo; con el fin de encontrar si el problema de mala sedimentabilidad se debe a Bulking (filamentos, ya sean bacterias u hongos) o a exceso de lodo. Esto se logra comparando la prueba al 100% y al 50%, si la prueba al 50% es exactamente la mitad de la sedimentabilidad presentada en la prueba al 100%, entonces se habla de exceso de lodo, si la prueba al 50% es más de la mitad de la prueba al 100%, entonces se trata de Bulking. En la práctica se corrió la prueba al 50% en algunos casos y se encontró para la mayoría de los casos que se trataba de Bulking y en otros casos se trataba de exceso de lodo como en el reactor flujo intermitente.

Para el R2K, un 86% de los casos fue hinchamiento de lodos y apenas un 14% se trató de exceso de lodo. Para el R1K, por la poca cantidad de biomasa, fue común en todas las pruebas de sedimentabilidad al 50% encontrar niveles por debajo de los 100 mL/L. Estos valores simplemente se reportaron como menores a 100 mL/L y por ello fue imposible relacionarlos con los resultados de la prueba al 100%. En el caso del R4K, un 88% de los casos significó exceso de lodo y un 12% hinchamiento de los lodos.

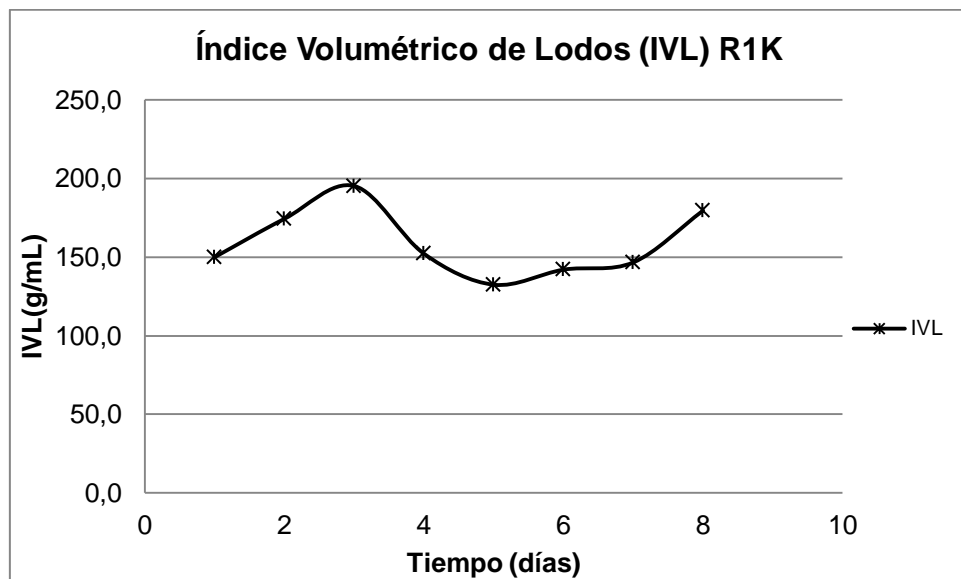
- El comportamiento del índice volumétrico de lodos del reactor R2K en el tiempo es presentado a continuación en la Figura 57.

Figura 57 IVL del R2K



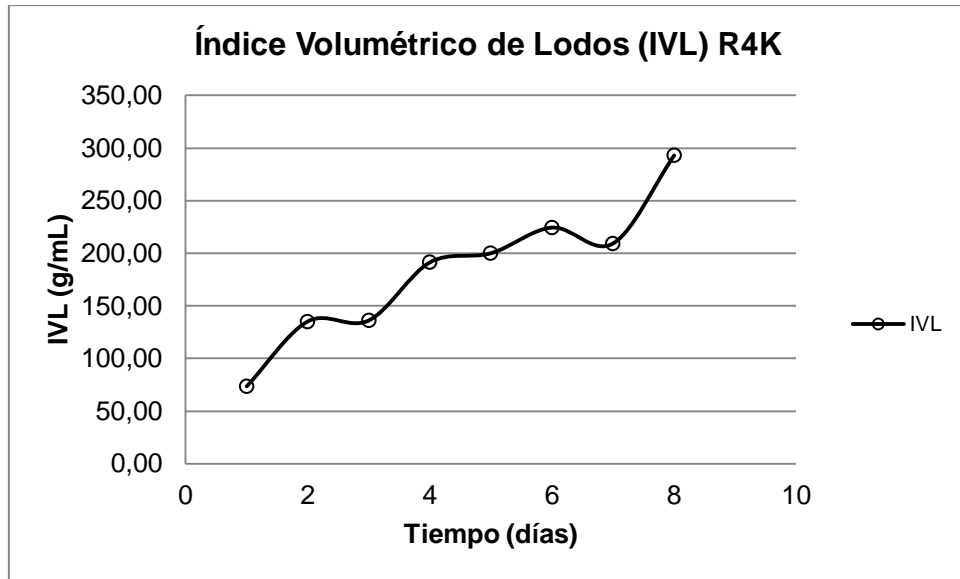
- El comportamiento del índice volumétrico de lodos del reactor R1K en el tiempo es presentado a continuación en la Figura 58.

Figura 58 IVL del R1K



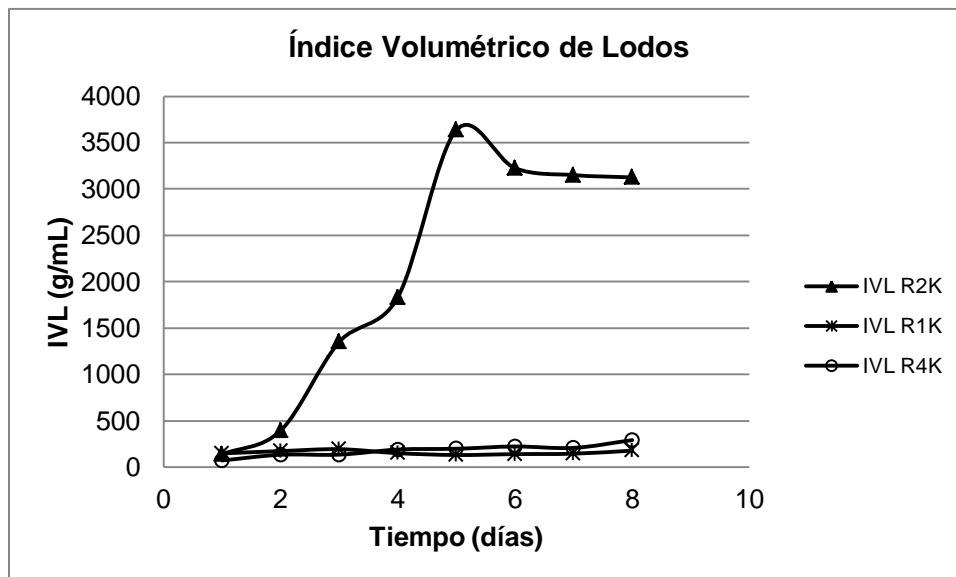
- El comportamiento del índice volumétrico de lodos del reactor R4K en el tiempo es presentado a continuación en la Figura 59.

**Figura 59** IVL del R4K



- El comportamiento del IVL de los tres reactores en el tiempo es presentada a continuación en la Figura 60.

**Figura 60** IVL de los reactores R2K, R1K y R4K



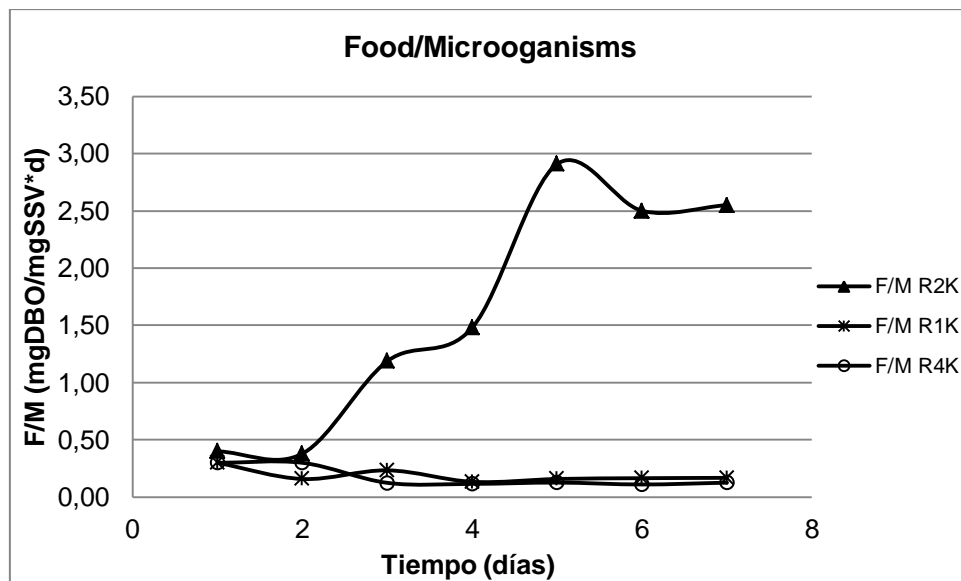
Tal y como sucede en el análisis del IVL en la fase 1, al graficar los IVL de los tres reactores juntos, ver Figura 60, no se distingue con detalle el comportamiento de este parámetro para los reactores R1K y R4K, pero al graficarlos por separado se diferencia claramente como el R1K muestra un IVL que oscila entre 133 y 200 g/mL. Un IVL que parece ocasionar cierto lavado de SST en el efluente, por ejemplo, en el día tres, donde se tiene el pico de mayor IVL, se presenta también ese mismo día el menor valor registrado de SST para ese reactor.

En el caso del IVL del R4K, si bien es un parámetro que transcurre en el tiempo de forma ascendente, los SST del reactor parecen no verse afectados por esto, pues no existe pérdida de biomasa sino hasta el séptimo día de los experimentos.

El IVL del R2K evoluciona de forma similar al del R4K, pero llegando a niveles exagerados de IVL debido a la poca cantidad de biomasa y a los altos valores de sedimentabilidad.

- El comportamiento de la F/M de los tres reactores en el tiempo es presentada a continuación en la Figura 61.

**Figura 61** F/M reactores R2K, R1K y R4K



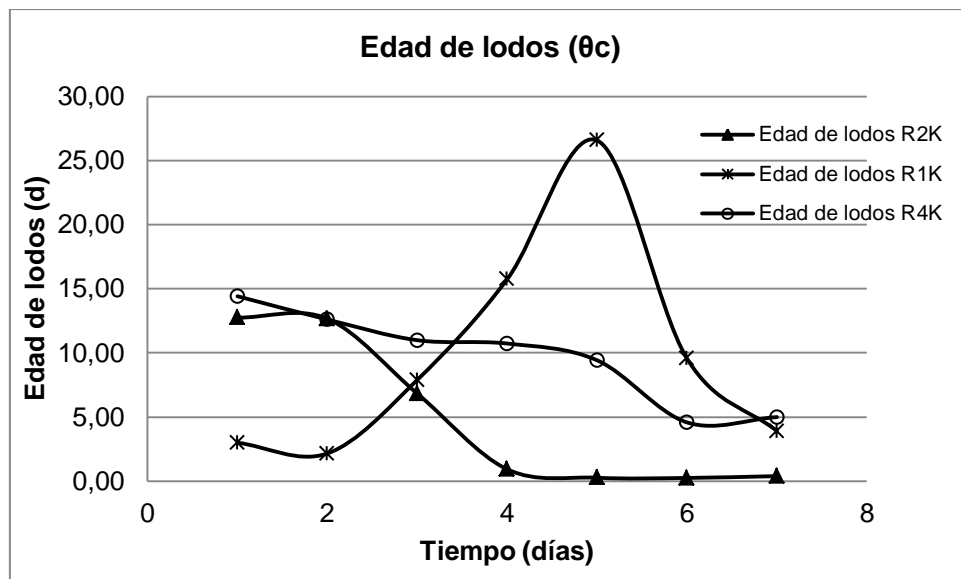
La gráfica de las relaciones F/M, ver Figura 61, muestra una tendencia similar a las observadas en la Figura 60 de los reactores. Para todos los reactores se inició con la misma F/M, y al trabajar con distintas cantidades de biomasa se agregaron entonces distintas cantidades de sustrato.

Al variar las cantidades de biomasa, por lavado o por purga, variaron los valores de F/M planteada inicialmente (0,3 mg DBO / mg SSV) y se decidió no volver a este valor por cuestiones prácticas.

La F/M del R2K se incrementa por efecto de la pérdida de SST del reactor, mientras que las relaciones F/M de los reactores R1K y R4K presentan un comportamiento más estable, incluso pareciendo disminuir tal vez por el efecto del incremento de la biomasa.

- El comportamiento de la edad de lodos de los tres reactores en el tiempo es presentada a continuación en la Figura 62

**Figura 62** Edad de lodos de los reactores R2K, R1K y R4K



Las edades de lodo tienen grandes variaciones, ver Figura 62, y se explican por la ausencia de control sobre este parámetro, con el trabajo del reactor en condiciones de arranque y por la posible pérdida de biomasa en el efluente a causa, o no, del hinchamiento de los lodos.

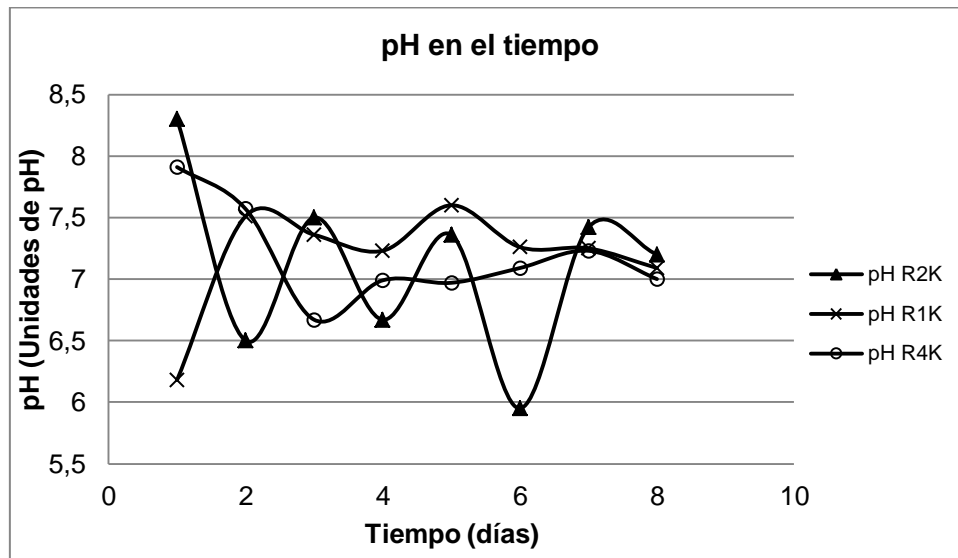
El R4K, que es quien presenta mayor estabilidad en los SST, muestra una lenta disminución de la edad de lodos, y si bien nunca se purgó, sí debieron haber aumentado, aunque ligeramente, los SST del efluente para que la edad de lodos disminuyera. El caso opuesto es para el R1K, donde los SST del efluente disminuyen, y sin existir purga, la edad de lodos se incrementa de forma abrupta.

La edad de lodos del R2K a partir del segundo día cae de forma exagerada, en parte por la purga que se le programó, y en parte porque desarrolló un terrible fenómeno de bulking, corroborado con el IVL y las observaciones al microscopio.

**1.2.3 Variables fijas.** Las variables fijas son aquellas variables que se manipulan a lo largo del proceso para que se mantengan en un rango constante, estas son el pH, el caudal y el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).

- El comportamiento del pH de los tres reactores en el tiempo es presentada a continuación en la Figura 63.

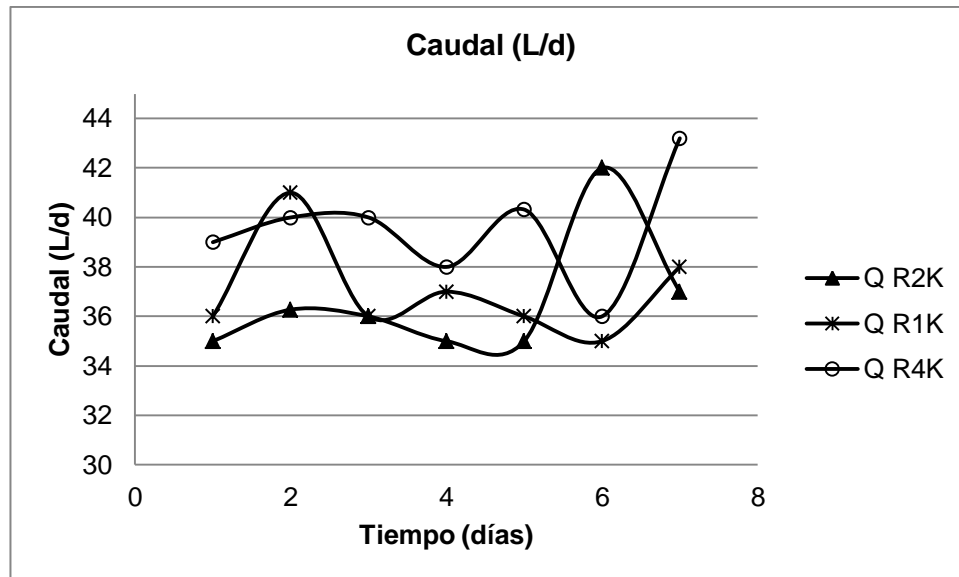
**Figura 63** pH de los reactores R2K, R1K y R4K



Al igual que en fase 1, hay un muy buen control de los niveles de pH, ver Figura 63, manteniendo valores cercanos al rango óptimo (7,5 – 8,5 unidades de pH) y siempre dentro del rango aceptable (6 – 9 unidades de pH).

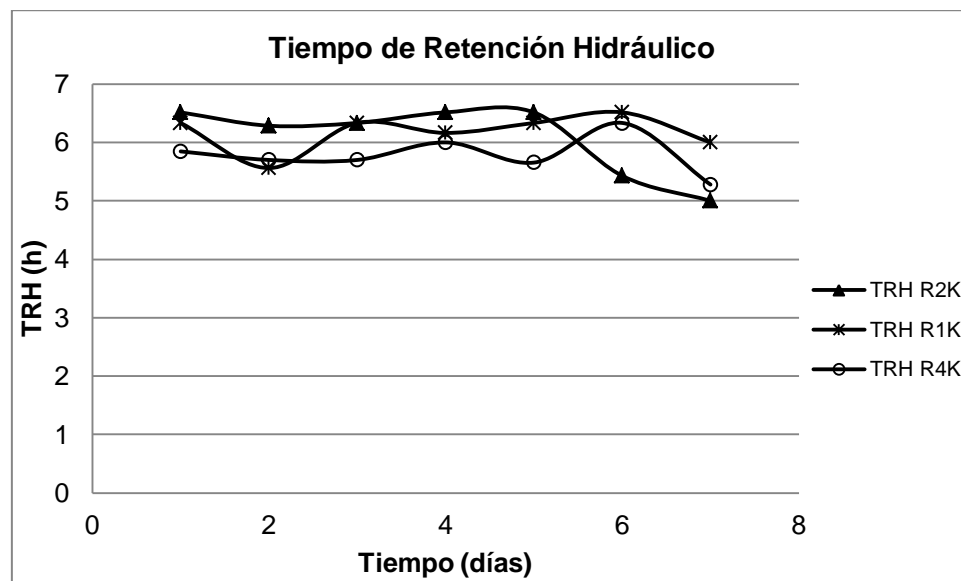
- El comportamiento del caudal de los tres reactores en el tiempo es presentada a continuación en la Figura 64

**Figura 64** Caudales de los reactores R2K, R1K y R4K.



- El comportamiento del TRH de los tres reactores en el tiempo es presentada a continuación en la Figura 65.

**Figura 65** Tiempos de retención hidráulico de los reactores R2K, R1K y R4K

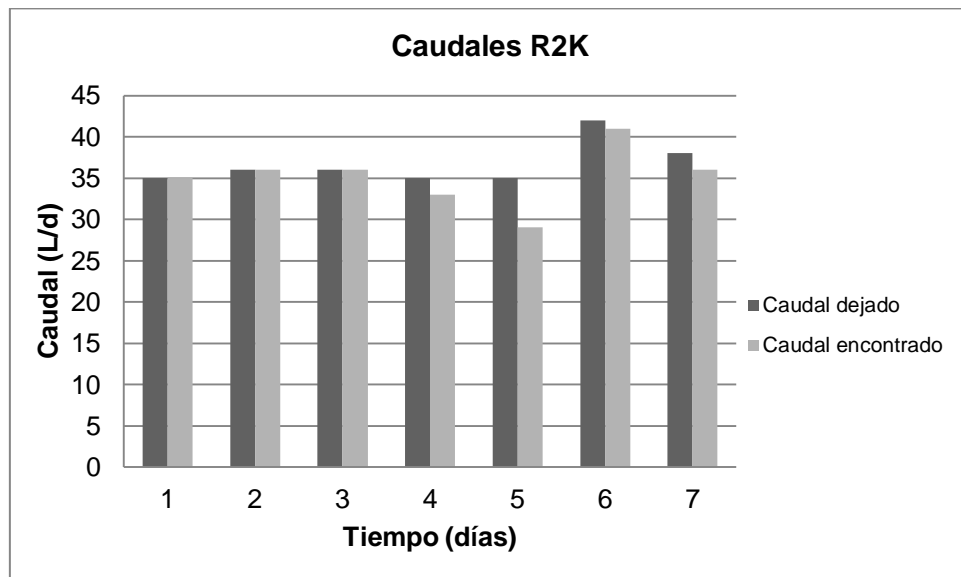


La Figura 64 muestra poca variación sobre los caudales de cada reactor. Si bien todos los reactores fueron iniciados pensando en un mismo caudal, éste lo

determinaba la capacidad mínima de la bomba peristáltica. Según este valor, se disponía de un recipiente para el ARS con capacidad suficiente y se calculaba la cantidad de sustrato a ser utilizado, de manera que todos los reactores trabajasen bajo una misma F/M.

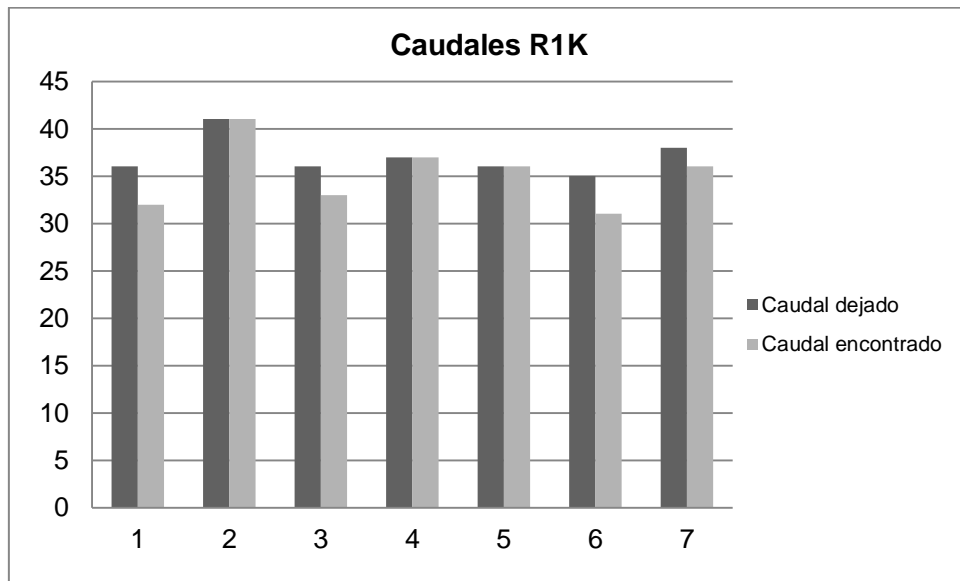
Se realizó un análisis gráfico sobre los fallos de la bomba peristáltica en la dosificación del caudal, al establecer las diferencias, día a día, entre el caudal con el que se dejó operando la bomba y el caudal con el que se encontró al día siguiente, ver Figura 66, Figura 67 y Figura 68. Esto permitió ver que el caudal del R4K, en las condiciones de experimentación, siempre fue encontrado con un caudal menor al que se dejó el día anterior, siendo la diferencia más grande el cuarto día, con más de 10 litros por día. Para el R2K y R1K solamente durante tres de los siete días de experimentación el caudal con el que se dejó fue el mismo caudal con el que se encontró al día siguiente. A pesar de esto, las diferencias no fueron muy significativas (en su mayoría las diferencias no fueron mayores a cinco litros por día).

**Figura 66** Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente para el R2K

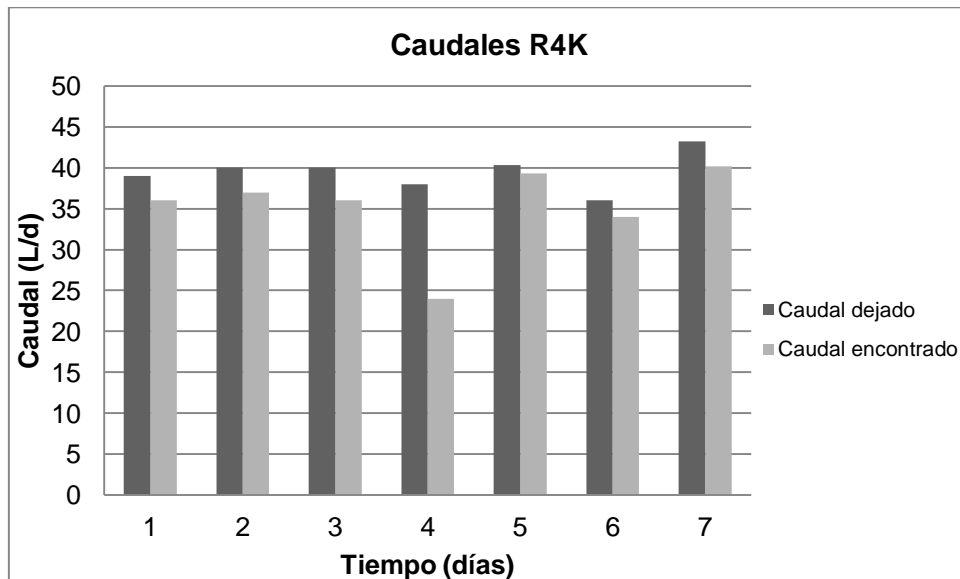




**Figura 67** Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente para el R1K



**Figura 68** Gráfica comparativa entre los caudales programados y encontrados al día siguiente para el R4K



El TRH, en la Figura 65, simplemente se comporta de forma invertida al caudal, y muestra cómo se mantiene en rangos completamente normales para este tipo de sistemas (5 – 7 horas).







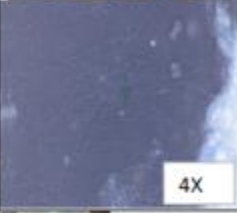
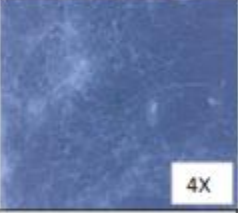

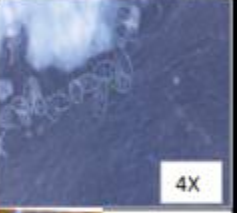





**1.1.4 Variables cualitativas.** Estas variables son fotos al microscopio de la biomasa en los reactores, fotos de los reactores en el tiempo y de algunas pruebas de sedimentabilidad.

El R2K, reactor con más rápido deterioro de su IVL (Ver Figura 57) muestra al microscopio el avance de los filamentos respecto al floc desde el segundo día de experimentación. A pesar de que al final del experimento se observan algunas vorticelas y rotíferos, los pocos granos de floc están completamente rodeados por largas y densas extensiones de filamentos.







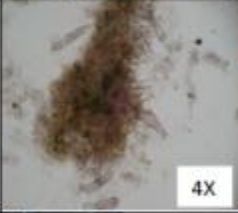
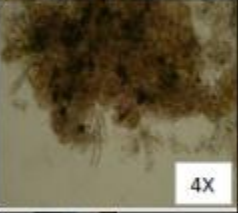
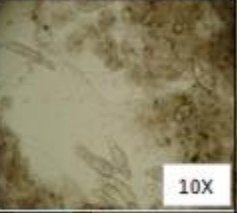






El R1K (ver Figura 70) describe un ligero alargamiento de los filamentos que provienen del floc, pero nunca en la cantidad que se observa en el R2K. El R4K también muestra algún crecimiento de microorganismos filamentosos que parece repercutir en la sedimentabilidad (ver Figura 71) pero sin llegar al punto de ocasionar un lavado significativo de biomasa en el efluente.

Se recomienda al lector referirse al Anexo #2 para visualizar de manera más detallada lo sucedido con los reactores a nivel microbiológico.






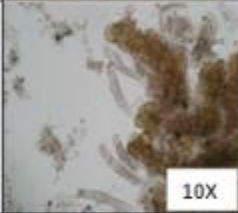


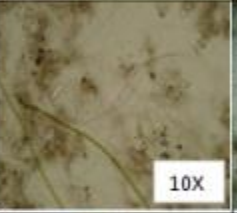
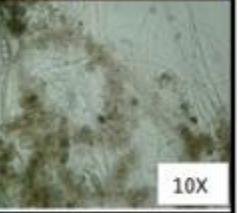





**Figura 69** Seguimiento fotográfico al R2K

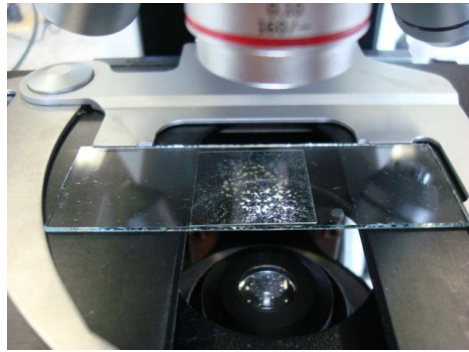
DIAS	FOTO	DÍA 0	DÍA 2	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 7				
REACTOR										
MICROSCOPIO										
PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD		278mL/L		970mL/L		980mL/L		990mL/L		No se puede leer 1000mL/L

**Figura 70** Seguimiento fotográfico R1K

DÍAS	FOTO	DÍA 0	DÍA 2	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 7
REACTOR						
MICROSCOPIO		 4X	 4X	 4X	 10X	 10X
PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD		 150 mL/L	 130 mL/L	 110 mL/L	 110 mL/L	 120 mL/L

**Figura 71** Seguimiento fotográfico R4K

DÍAS	FOTO	DÍA 0	DÍA 2	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 7
REACTOR						
MICROSCOPIO		 10X	 10X	 4X	 10X	 10X
PRUEBA DE SEDIMENTABILIDAD		 350 mL/L	 550 mL/L	 800 mL/L	 900 mL/L	 900 mL/L



## CAPÍTULO V

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. CONCLUSIONES

- Los reactores aerobios en mezcla completa a escala de laboratorio en fase de arranque, al mantener niveles de OD y pH apropiados, alimentados con un sustrato rico en macro y micronutrientes y en una relación balanceada aproximada a 100:5:1 para DQO:N:P, desarrollan diferencias en su sedimentabilidad al someterse a distintos regímenes de flujo. El reactor alimentado con flujo intermitente muestra un mejor comportamiento del IVL en el tiempo con respecto al reactor alimentado con flujo continuo, al favorecer este último el crecimiento de microorganismos filamentosos. Esta diferencia entre los dos regímenes de flujo tiene influencia directa sobre las oportunidades de lavado de biomasa en el efluente del reactor.
- Los tiempos de inanición (tiempo durante el cual el reactor no recibe alimentación) parece tener una relación con el comportamiento de los valores de IVL, pues si bien se requiere que exista cierto gradiente en la dosificación del sustrato para que exista una selección metabólica entre microorganismos filamentosos y formadores de floc, al incrementarse los tiempos de inanición, sin incrementar la carga de sustrato, se incrementan los niveles de IVL. Esto podría ir de acuerdo con algunas teorías de otros autores que asocian los periodos de alimentación con una fase corta exógena, y la inanición con una fase larga endógena, donde en la primera ocurre conversión del sustrato en materiales de reserva para en la segunda ser degradado. De ser así, el incremento paulatino de la fase endógena, manteniendo constantes las concentraciones de sustrato podría agotar las reservas que han podido crear los microorganismos formadores de floc y ser superados por los microorganismos filamentosos.
- Según las condiciones de los estudios realizados, no parece haber alguna relación entre la cantidad de inóculo empleado en los reactores aerobios mezcla completa a escala de laboratorio y con flujo continuo y el tiempo transcurrido para la aparición de bacterias filamentosas y el empeoramiento del IVL. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que no existió mayor control sobre variables de interés como la edad de los lodos o la relación F/M que se vio afectada por lavados de biomasa en el efluente.

## 2. RECOMENDACIONES

Sería de gran utilidad repetir las experimentaciones para reactores que han sido previamente estabilizados; esto se determinaría asegurando tres condiciones básicas medibles en el mismo laboratorio:

- Estableciendo una DQO del afluente constante: esto se logra alimentando los reactores con una receta estandarizada para el agua residual sintética que se emplea. Actualmente se cuenta con suficiente bibliografía al respecto y si bien no existe una receta perfecta, se sabe que ésta debe proporcionar los nutrientes necesarios para el buen desarrollo de la biomasa. Por ejemplo, el nitrógeno y fósforo teniendo en cuenta la relación carbono:nitrógeno:fósforo o DBO:N:P en la proporción 100:5:1, además del chequeo del nitrógeno y fósforo en el efluente para garantizar que a pesar de que se trabaje con la relación ideal de DBO:N:P no exista deficiencia de estos nutrientes. Los micronutrientes también deben estar presentes en la receta del agua residual sintética, tales como hierro, azufre, magnesio, calcio, entre otros, siempre en cantidades apropiadas pues su exceso podría inhibir la biomasa. Es importante también tener en cuenta la naturaleza de la fuente de carbono y la biodegradabilidad del agua residual sintética preparada, pues ciertos episodios de bulking filamentoso pueden atribuirse a compuestos de bajo peso molecular y aguas residuales altamente biodegradables.
- Logrando una concentración de sólidos suspendidos volátiles constantes en el reactor: esto se logra teniendo absoluto control sobre la edad de lodos del reactor, o sobre la relación F/M, de manera que se tenga seguimiento al inventario de lodos del sistema y se establezca el programa de purgas (la cantidad diaria de lodo a extraer del reactor). Estos lodos también pueden trabajarse como sólidos suspendidos totales; aunque en este caso no debería descartarse el conocer la relación aproximada de SSV/SST de los lodos, que para el caso de los ensayos a escala de laboratorio donde se manejan aguas residuales sintéticas debe ser superior al 70%. Dependiendo de la configuración del reactor se puede tener cierto control sobre los lodos de retorno, pero en el caso de los reactores donde la base de aireación y el sedimentador están juntos no queda otra opción que tener especial cuidado con la abertura que comunica ambos compartimentos, pues esto definirá en buena parte cuánto es el retorno de los lodos.



- Alcanzando una DQO del efluente constante: Si se logra mantener una DQO del afluente constante y una concentración en el reactor de SSV constante, se estará trabajando entonces con una F/M constante (asumiendo que no habrán grandes variaciones en el caudal afluente) y esto llevará al sistema a alcanzar su “tope de eficiencia” demostrándolo con una DQO del efluente más o menos constante. Independientemente de que entre la DQO del afluente y del efluente se muestre una gran o poca eficiencia de remoción, una DQO del efluente constante estará significando que la biomasa se ha aclimatado al agua residual que está recibiendo y que no están habiendo grandes cambios en la cantidad de microorganismos, de manera que será posible afirmar que el reactor se ha estabilizado. En ese punto podrán entonces determinarse los coeficientes biocinéticos, que es el objetivo principal de los reactores aerobios mezcla completa a escala de laboratorio que hacen parte de programas académicos en las universidades.
- Una evaluación que aportaría mucho en el reconocimiento de las causas de la aparición del fenómeno del bulking en casos a escala de laboratorio, es el chequeo de las condiciones hidráulicas del reactor, es decir, identificación de zonas muertas, tipo de mezcla, corto circuitos, etc. Antes de arrancar con los experimentos sería de gran aporte el realizarle este tipo de ensayos al reactor con el que se piensa trabajar.
- Otra contribución interesante de nuevos estudios sería la de evaluar la evolución de las características del ARS cuando está siendo “recirculada”, como en el caso del reactor que funcionó bajo flujo intermitente con mezcla entre el agua residual efluente con la afluente, debido a que el tipo de bomba que permitía el acople al temporizador era sumergible y variaba su caudal conforme a la altura del líquido en la que estaba sumergida.
- Cuando se buscan las causas de la aparición del bulking filamentoso es de gran ayuda poder conocer el tipo de filamentos predominantes, de manera que se trabaja específicamente sobre las causas de aparición de esos filamentos y la solución se hace más selectiva y rápida. Lastimosamente para estos ensayos sólo se logró describir cualitativamente al microscopio la abundancia de filamentos y de otras especies microbiológicas de interés, pues aunque se trató de la mano de expertos la identificación de al menos alguno de los filamentos, no fue posible dar con algún nombre. Seguramente, con un mayor presupuesto hubiese sido probable optar por

un moderno método de identificación como lo es la técnica FISH (*Fluorescent In Situ Hybridization*).

- En algunos artículos donde también se trabaja con reactores a escala de laboratorio, mencionan la importancia de limpiar con hipoclorito de sodio, o con algún desinfectante, las mangueras que conducen el afluente, debido a que en éstas se acumula una película que en la mayoría de casos está compuesta por microorganismos filamentosos que pudieran repercutir negativamente en la microbiología del reactor al nutrir el mismo de este tipo de bacterias. En el caso de los ensayos realizados, las mangueras fueron limpiadas con agua a presión diariamente, y en ocasiones se llevó al microscopio la biopelícula extraída de la manguera que alimentaba al reactor con el sustrato para corroborar que se trataba de masas filamentosas, zooglea y bacterias libres.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **E. Rodríguez, L. Isac, N. Fernández, Sornoza.** *Identificación de bacterias filamentosas en EDAR industriales.* Sevilla [En línea] [Citado el 9 de Febrero de 2011] <<http://www.slideshare.net/bioindicacion/identificacion-de-bacterias-filamentosas-en-edar-industriales>>
2. **Hossain, F.** *Activated sludge bulking: a review of causes and control strategies.* India. En: Institution of engineers of India, 2004, Vol. 85.
3. **Environmental Leverage.** *Grease and septicity.* En: The WasteWater insight. 2007, Vol. 4.10.
4. **Environment Federation Water.** *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants.* En: Management and Support Systems. 6, 2007, Vol. 1.
5. **(EPA), Environmental Protection Agency.** *The Causes and control of activated sludge bulking and foaming.* Washington, D.C : U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1987.
6. **Rensink, J. H.** *New approach to preventing bulking sludge.* En: Cience direct - Water research, 1974.
7. **D. Gallego, J. Osorlo, E. Ramírez.** *Evaluación del diseño de un sedimentador secundario para lodo activo.* Vol. 462. Bogotá, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero químico). Universidad Nacional de Colombia.
8. **Telma Beatriz Pavón Silva, Víctor F Pacheco Salazar, Clemente Ávila, Virginia Mejía Pedrero.** *Efecto y control de esponjamiento de lodos en una tratadora de aguas residuales industriales.* Toluca, México, 2004. En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 29, San Juan, 22-27 Ago. 2004.
9. **Tecniaguas Industrial y Comercial.** Tecniaguas Industrial y comercial S.A. [En línea] [Citado el: 10 de Febrero de 2011.] <<http://www.tecniaguas.com/empresa.php>>.
10. **Hanna Instruments Instrumentos de medición y control.** Hanna instruments Instrumentos de medición y control. [En línea] [Citado el: 10 de Febrero de 2011.]

<<http://www.hannacolombia.com/articulos-de-interes/articulos/199-etapas-tratamiento-aguas-servidas.>>

11. **Caravelli, Alejandro H, y otros, y otros.** *Microorganismos filamentosos y floculantes mediante técnicas respirométricas.* Porto Alegre, Brasil, 2000 . En: XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería sanitaria y ambiental.
12. **Alleman, James E.** *The genesis and evolution of activated sludge technology.* Indiana, USA. 22 de Septiembre de 2003. [En línea] [Citado el: 7 de Marzo de 2010.]  
<[http://academics.utep.edu/Portals/851/Activated%20Sludge%20Technology%20\(Spring%202003\).pdf](http://academics.utep.edu/Portals/851/Activated%20Sludge%20Technology%20(Spring%202003).pdf)>
13. **Inc., Environmental leverage.** *An overview of Wastewater treatment.* Chicago, Illinois, 2005.
14. **Tomilson., B. Chambers y E.J.** *Bulking of activated sludge: Preventative and Remedial Methods.* Chichester. Reino Unido,1982. En: Ellis Horwood Limited, 1982.
15. **Albertson., Orris E.** *The control of bulking sludge: From the early innovators to current practice.* En: Journal WPCF, 1987, Vol. 59.
16. **Martins, Antonio M.P.** *Filamentous bulking sludge - a critical review.* Delf, Holanda, 2003. En: Water research, 38.
17. **Pagilla., Krishna.** *Filamentous bulking sludge - A critical review.* Illinois, Chicago, 2003. En: Water research, 38.
18. **W., Donaldson.** *Use of activated sludge increasing.* Michigan, 1932.
19. **Prakasam, James E. Alleman y T.B.S.** *Reflections on seven decades of activated sludge history.* Indiana, 1983. USA : J WPCF, Vol. 55.
20. **Verachtert H, Van den Eynde E, Poffle R, Houtmeyers J.** *Relations between substrate feeding pattern and development of filamentous bacteria in activated sludge. Part II: Influence of substrate present in the influent.* Louvain, Bélgica, 1980. En: European Journal of applied microbiology and biotechnology, Vol. 9. p. 137-149.
21. **Pasveer, A.** *A contribution to the development in activated sludge treatment.* Ontario, Canada, 1959. En: J Proc Inst Sewage Purif, Vol. 4. p. 436.

22. **Pasveer, A.** *A case of filamentous activated sludge.* Ontario, Canada, 1969. Journal WPCF, Vol. 41. p. 7.
23. **Irvine R.L, Davis WB.** *Use of sequencing batch reactors for waste treatment.* Texas, USA, 1971. En: Ann Arbor Science Publishers.
24. **Centre, Water Research.** Water Research Centre. [En línea] 4 de Febrero de 1976. [Citado el: 3 de Marzo de 2010 .] <http://www.wrcplc.co.uk/>.
25. **DH., Eikelboom.** *Identification of filamentous organisms in bulking activated sludge.* Inglaterra, Reino Unido, 1977. En: Prog Water Technol.
26. **Eikelboom DH, Van Buijsen HJJ.** *Microscopic sludge investigation manual, 2da edicion.* Reino Unidi, Inglaterra : TNO reporte A 94A, 1981.
27. **Jenkins D, Richard MG, Daigger GT.** *Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming. 2da Ed.* Michigan, USA, 1993. Editado por: Lewis Publishers.
28. **Ph.D., Michael Richard.** *Activated sludge microbiology problems and their control.* Fort Collins, CO. Presentado en: The 20th Annual USEPA National Operator Trainers Conference, Junio 8 de 2003.
29. **Galarza, A.** Centro de estudios e investigaciones tecnicas de Gipuzkoa. [En línea] 2006. [Citado el: 4 de Marzo de 2010.] [http://www.ceit.es/electrocom/electronics/tesis/agalarza/apendice\\_A.pdf](http://www.ceit.es/electrocom/electronics/tesis/agalarza/apendice_A.pdf).
30. **Pujol y Chudoba.** *Kinetic selection of microorganisms by means of a selector - Twenty years of progress: History, practice and problems, 1994.* En: Water Science Technology. Vol. 29. p.177-180.
31. **J., Wanner.** *Activated sludge bulking and foaming control.* Co Lancaster, PA, USA : Technomic publishing, 1994.
32. **Chudoba, P Grau and V Ottova.** *Control of activated sludge filamentous bulking, effect of hydraulic regime or degree of mixing in an aeration tank.*USA. En: Water Resource, 1973, Vol. 7. p. 1163-1182
33. **Díaz, Sebastián N. Delgado.** Nuevas tecnologías de depuración de aguas residuales. *Universidad Ambiental de la Palma.* [En línea] [Citado el: 22 de Febrero de 2010.] [http://www.universidadambientaldelapalma.es/alumnos/documentos/el\\_agua/ponecias/TextoSebastian2.pdf](http://www.universidadambientaldelapalma.es/alumnos/documentos/el_agua/ponecias/TextoSebastian2.pdf).

34. **Hoyos, Juan Manuel López.** *Lodos Activados*. Querétaro, México : Grupo DURMAN, 2006.
35. **Miranda, Juliana Knobelsdorf.** Eliminación biológica de nutrientes en un ARU de baja carga orgánica mediante el proceso VIP. *Universitat Politècnica de Catalunya* . [En línea] 14 de Julio de 2005. [Citado el: 20 de Febrero de 2010.] [http://www.tesisenred.net/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0727105-133519//08Mjkm08de18.pdf](http://www.tesisenred.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0727105-133519//08Mjkm08de18.pdf).
36. **J., Álvaro Orozco.** *Plantas pilotos de lodos activados para investigación del tratamiento de aguas residuales industriales*. Medellín, Colombia. 1977.
37. **Boyter, Henry A.** Help Forums. *www.waterandwastewater.com* . [En línea] 19 de Diciembre de 2009. [Citado el: 2 de Marzo de 2010.] <http://www.waterandwastewater.com/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?num=1259600952>.
38. **Richard, Michael.** Help Forums. <http://www.waterandwastewater.com/>. [En línea] 23 de Enero de 2010. [Citado el: 2 de Febrero de 2010.] <http://www.waterandwastewater.com/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?action=viewprofile;username=537874637865556270170>.
39. **Anthony F. GAUDY, Richard S. Engelbrecht, y Ralph D. De Moss.** Laboratory Scale Activated Sludge Unit. *Applied and Environmental Microbiology*. [En línea] 1960. [Citado el: 17 de Febrero de 2010.] <http://aem.asm.org/cgi/reprint/8/5/298.pdf>.
40. Environmental Leverage Inc., - Troubleshooting-Digestors. <http://www.environmentallevverage.com>. [En línea] 2003. [Citado el: 19 de Enero de 2010.] <http://www.environmentallevverage.com/Digestors.htm>.
41. **Richard, Michael.** Practical Control Methods For Activated Sludge Bulking and Foaming. <http://www.dec.ny.gov/>. [En línea] Departamento de Conservación Ambiental del Estado de Nueva York, 2010. [Citado el: 2 de Marzo de 2010.] <http://www.dec.ny.gov/chemical/34373.html>.
42. **Serrano, Emilio.** Control de la deficiencia de nutrientes en un proceso de depuración biológica. <http://www.surcis.com/>. [En línea] Surcis , 2010. [Citado el: 20 de Enero de 2010.] <http://www.surcis.com/ControldeLaDeficienciadeNutrientes.pdf>.

43. **Pickett, Russell.** Help forums. *http://www.waterandwastewater.com/*. [En línea] 16 de Octubre de 2009. [Citado el: 16 de Octubre de 2009.] *http://www.waterandwastewater.com/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?num=1255555214*.
44. **Jenkins, David.** Help Forums. *http://www.waterandwastewater.com/*. [En línea] 16 de Octubre de 2009. [Citado el: 16 de Octubre de 2009.] *http://www.waterandwastewater.com/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?num=1255555214*.
45. **L. Méndez, V. Miyashiro, R. Rojas, M. Cotrado, N. Carrasco.** *Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio*. Lima, Peru, 2004. En: Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, Vol. 7.
46. CARTA ELECTRÓNICA de **Paul Imhoff**. Experto en el tema de tratamiento de aguas residuales e industriales, Medellín, 14 de Julio de 2009.
47. Aerobic Biological Treatability Study of Sodium Acetate. *Environmental Engineering Laboratory, University of Delaware*. [En línea] 2008. [Citado el: 14 de Agosto de 2009.] *http://research.ce.udel.edu/~imhoff/cieg337/assignments/6-cstr\_reactor\_08.pdf*.
48. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. *Universidad de Antioquia*. [En línea] 13 de Mayo de 2008. [Citado el: 2 de Marzo de 2010.] *http://jaibana.udea.edu.co/programas/pagina\_isa/programas/ISA%20454%20procesosbiologicos/ISA454.doc*.
49. ENTREVISTA con **Francisco Molina**, profesor de procesos bioquímicos de la Universidad de Antioquia (Sede Medellín). Medellín, 15 de Agosto de 2009.
50. **Rodríguez, Manuel Gil.** *Modelo dinámico del proceso secundario de depuración de aguas residuales urbanas*. Madrid, España, 1998. En: Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 14.
51. **António M.P. Martinsa, Joseph J.Heijnen, Mark C.M. van Loosdrechta.** *Effect of feeding pattern and storage on the sludge settleability*. The Netherlands, 2003. En: Water Research, Vol. 37.
52. **J. Houtmeyers, E. van den Eynde, R. Poffd, and H. Verachtert.** *Relations Between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes. Part 1: Influence of process parameters*. Louvain, Bélgica, 1980. En: European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 9. p. 63-77.

53. **E. Van den Eynde, L. Vriens, and H. Verachtert.** *Relation Between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes: Part III. Applications with Industrial Waste Waters.* Louvain, Bélgica, 1980. En: *European Journal of applied microbiology and biotechnology*, Vol. 15. p. 246-251.
54. **López, Maria Guadalupe Barajas.** Eliminación biológica de nutrientes en un reactor biológico secuencial. *Universitat Politècnica de Catalunya*. [En línea] 4 de Abril de 2002. [Citado el: 1 de Marzo de 2010.] [http://www.tdr.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-161032//04Mgbl04de11.pdf](http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-161032//04Mgbl04de11.pdf).
55. **Leverage, Environmental.** Environmental leverage. [En línea] [Citado el: 11 de Febrero de 2011.] <http://www.environmentalleverage.com/Rotifer.htm>.
56. **Beccari et al., 1998, y Martins.** *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design.* 1998.
57. **Gerardi, Michael H.** *Settleability problems and loss of solids in the activated sludge process.* USA, 2002. En: *Environmental Protection Magazine series.*
58. **(EPA), Environmental Protection Agency.** *The Causes and control of activated sludge bulking and foaming.* Washington, D.C, USA, 1987. Por: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
59. **Alleman, James E.** *The genesis and evolution of activated sludge technology. Indiana, USA.* [En línea] 22 de Septiembre de 2003. [Citado el: 7 de Marzo de 2010.] [http://academics.utep.edu/Portals/851/Activated%20Sludge%20Technology%20\(Spring%202003\).pdf](http://academics.utep.edu/Portals/851/Activated%20Sludge%20Technology%20(Spring%202003).pdf).
60. **Environmental leverage .** *An overview of Wastewater treatment.* Illinois : Environmental Leverage, 2005.



## ANEXOS

### Anexo 1. Fotos relevantes al microscopio para la primera fase.

Figura 72 Reactor1 y 2 en el día 8 del experimento

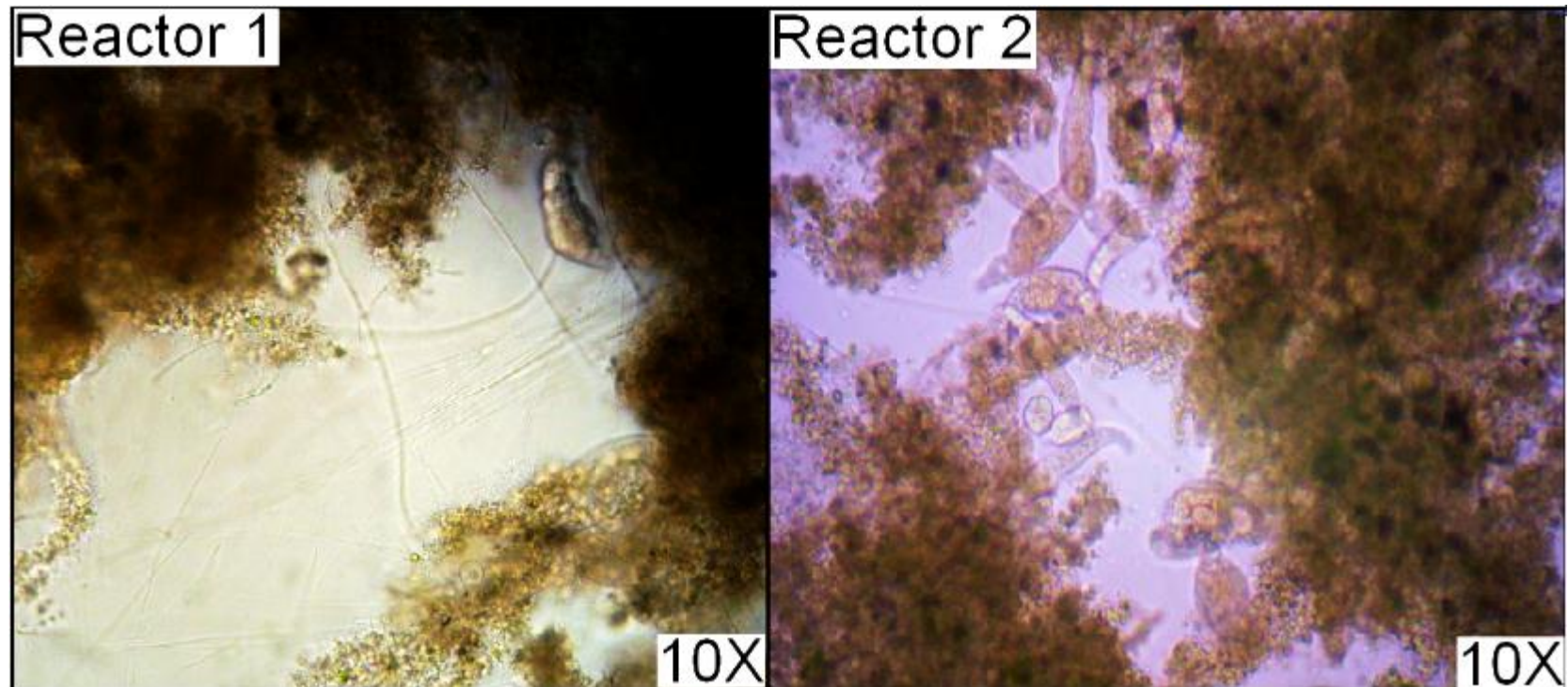
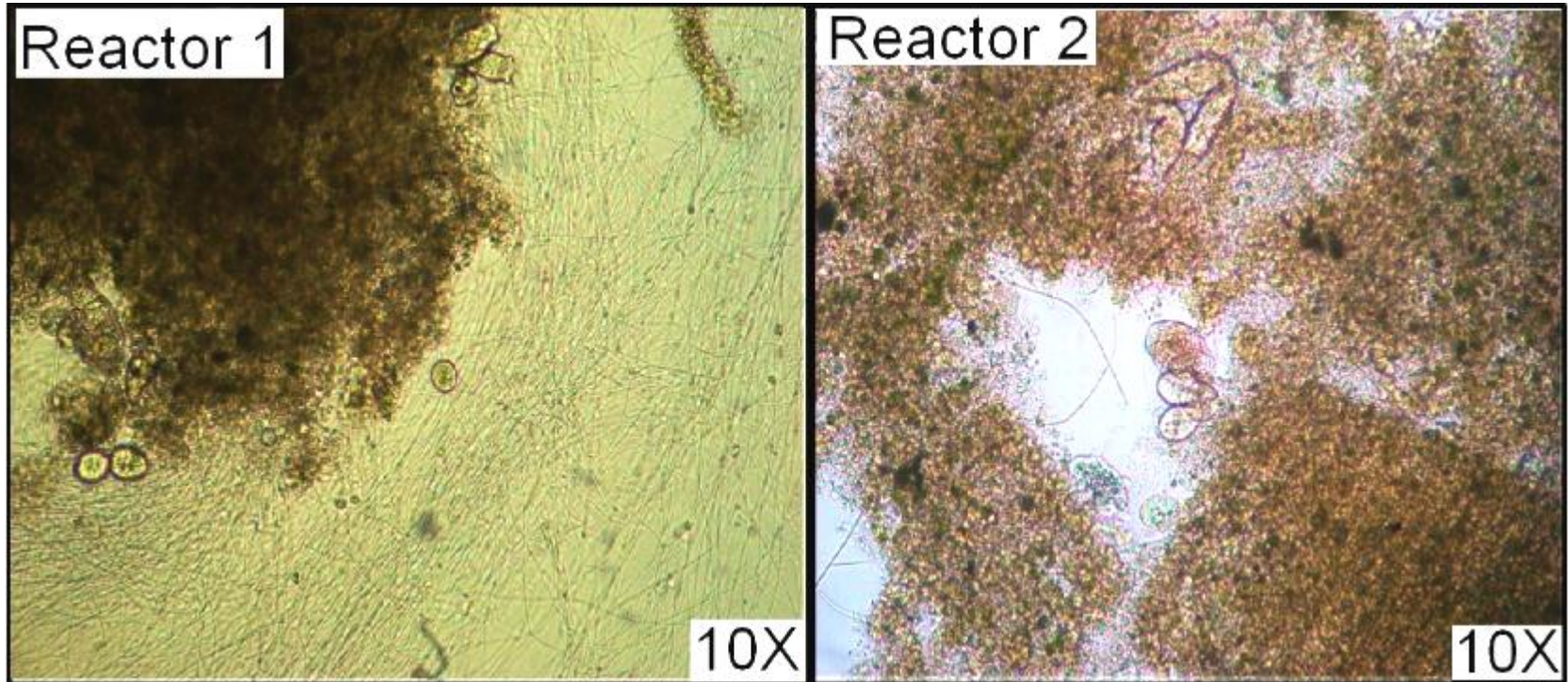


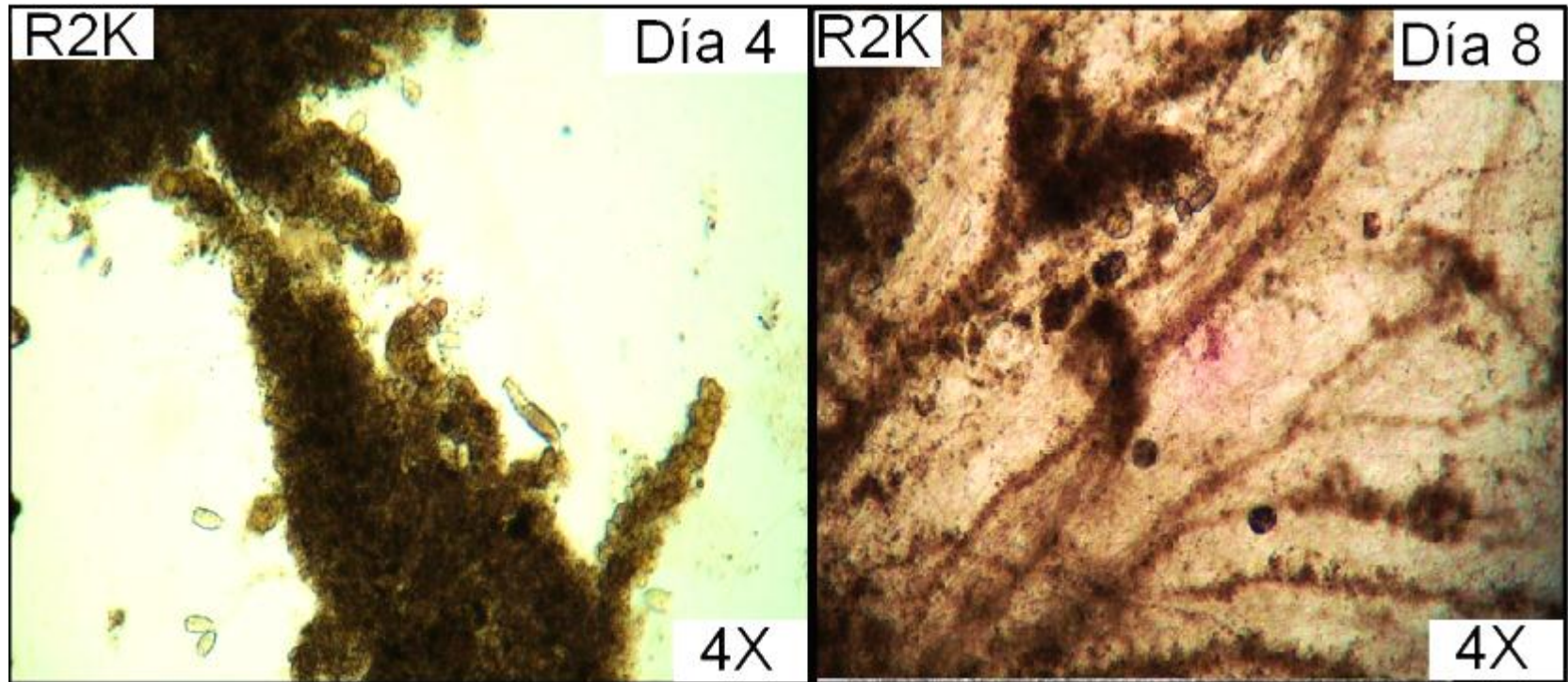
Figura 73 Reactor1 y 2 en el día 14 del experimento





**Anexo 2. Fotos relevantes al microscopio para la segunda fase.**

**Figura 74** Reactor 2K en el día 4 y 8 del experimento



**Figura 75** Reactor 1K en el día 3 y 6 del experimento

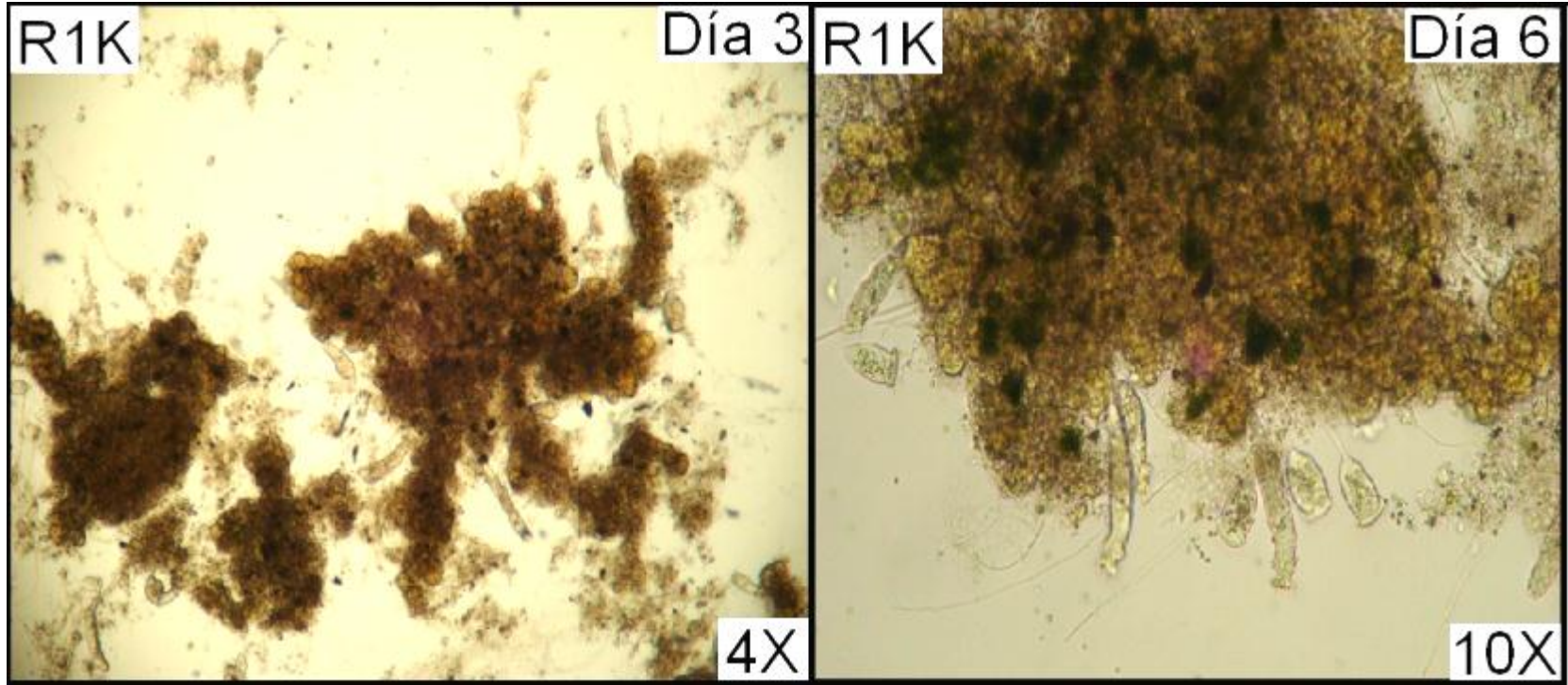
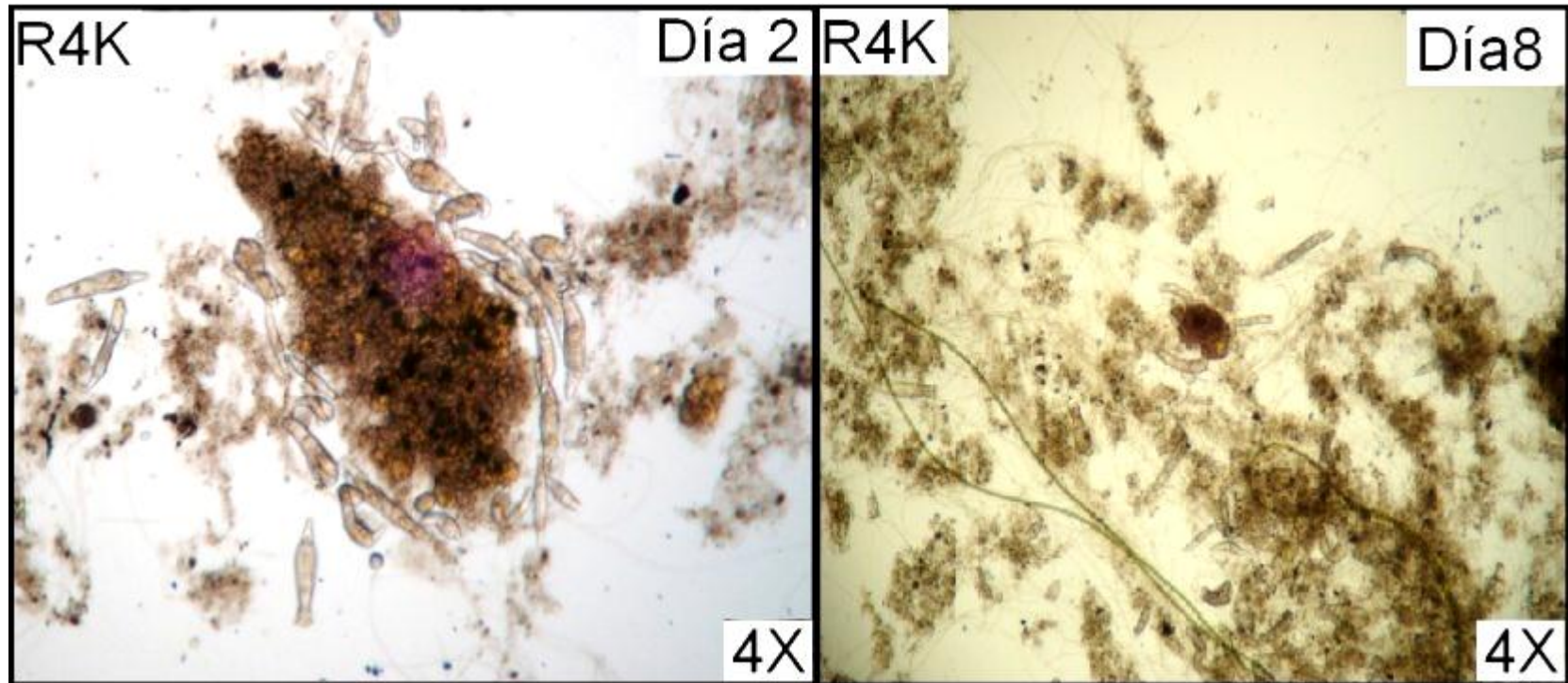



Figura 76 Reactor 4K en el día 2 y 8 del experimento









***ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DE LOS EFECTOS  
DE LA FORMA DE ALIMENTACIÓN Y DE LA CANTIDAD  
DE INÓCULO SOBRE EL HINCHAMIENTO DE LOS LODOS  
DE REACTORES AEROBIOS MEZCLA COMPLETA EN  
ETAPA DE ARRANQUE***

Por:

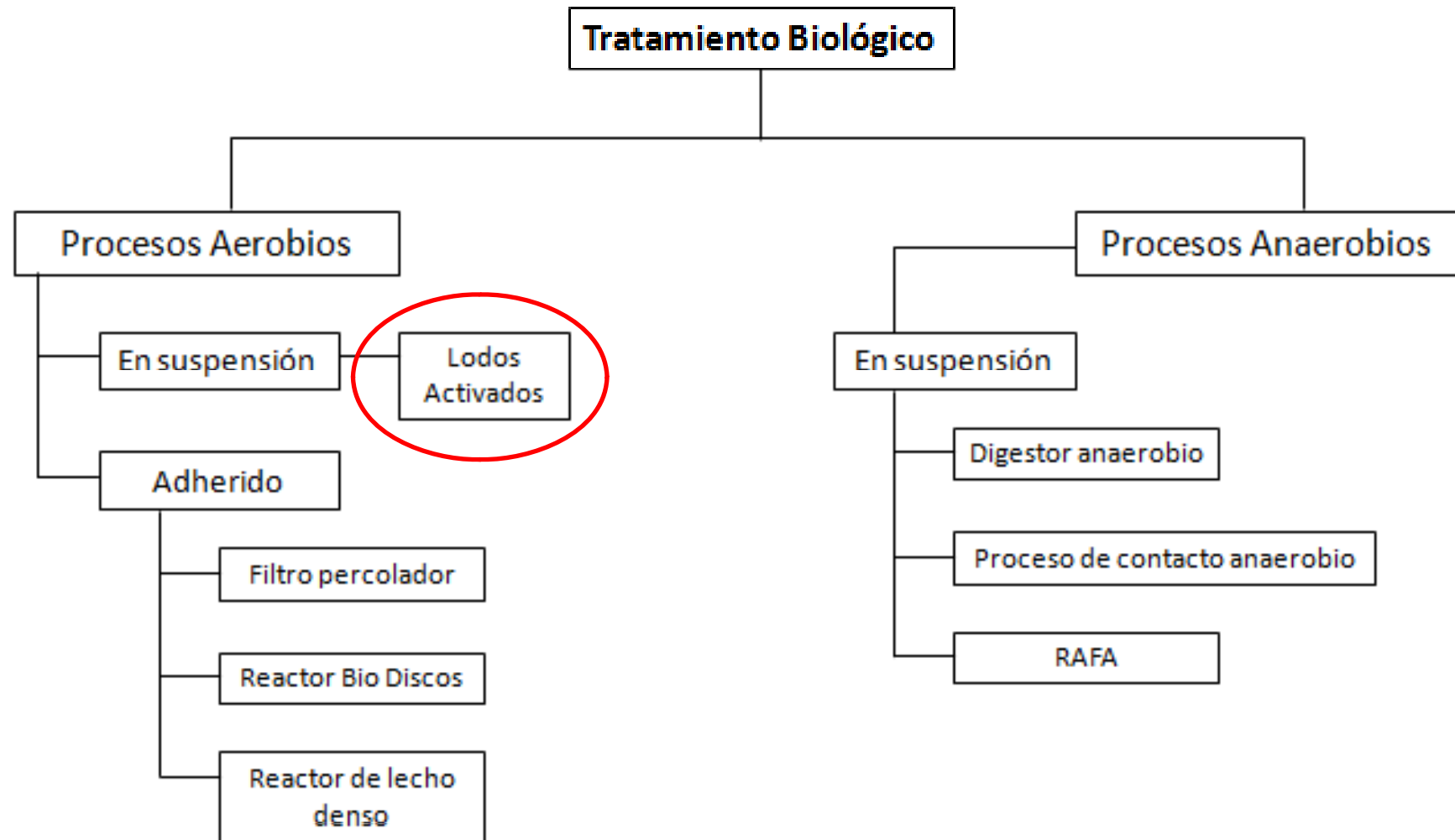
LIZ ARANGO MUÑOZ  
JUAN DAVID LÓPEZ HINCAPIÉ

Asesores:

CARLOS ALBERTO SIERRA RAMIREZ  
JUAN DAVID CORREA ESTRADA

2011

# 1. Introducción





# 1. Introducción

City of Fairfield WWTP – Ohio (USA)

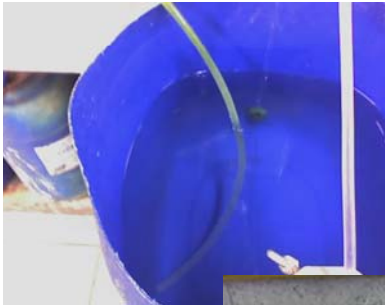


Agua residual -  
Afluente

Tratamiento biológico

Sedimentación  
secundaria

Efluente



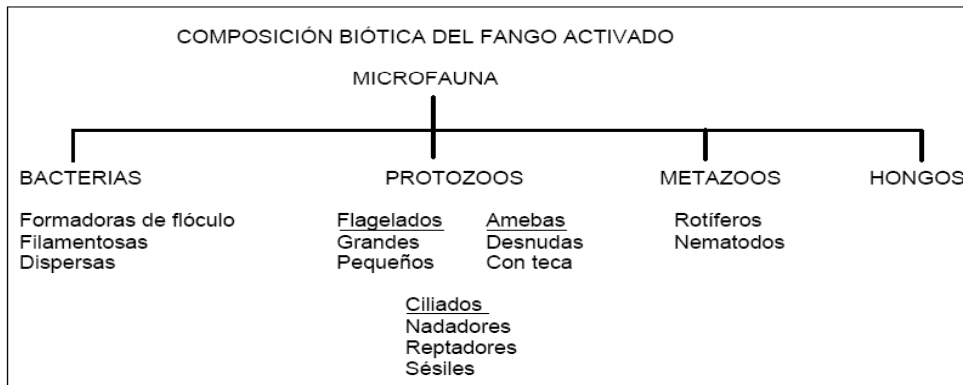
# 1. Introducción



Biomasa



Ing. Daniel Velazquez. Argentina. 2002.

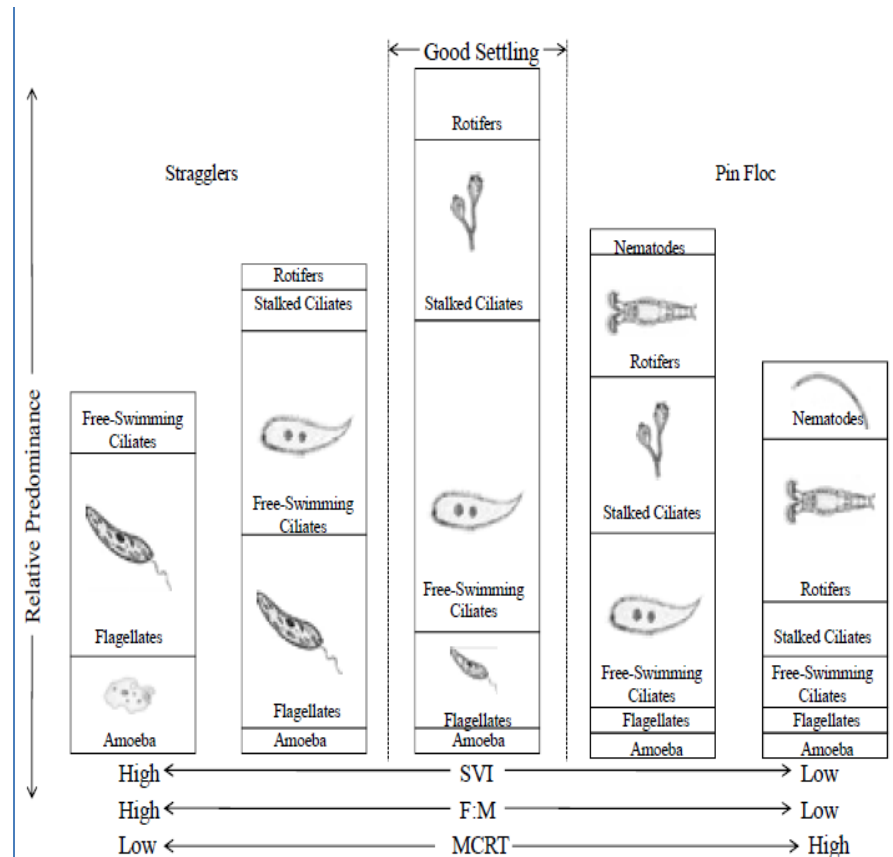


Composición biótica de los fangos activados (Parody, 1997).

Environmental Leverage INC.

**Acceptable Environmental Parameters for Biological Activity:**

PARAMETER	ACCEPTABLE	OPTIMUM
Dissolved Oxygen	>0.5 mg/l	1.0 - 2.0 mg/l
Temperature	40 - 95. F	77 - 95 ° F
pH	6.0 - 9.5	7.5 - 8.5
Ammonia Residual	1.0 - 3.0 mg/l	2.0 - 3.0 mg/l
Ortho-phosphate Residual	0.5 - 2.0 mg/l	1.0 - 2.0 mg/l



Fleming Training Center, Advanced wastewater treatment, 2011.

# 1. Introducción



Pin Point floc



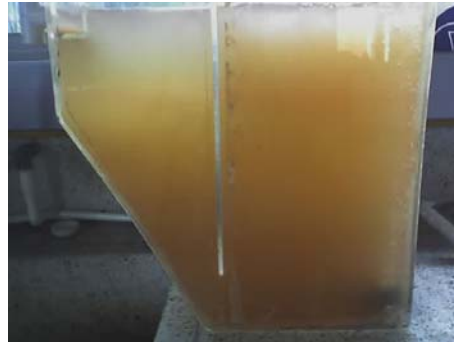
Weak floc



Good floc



Filamentous floc



# 2. Problema de investigación

## 2.1. Causas

- Deficiencia de macro-nutrientes (N, P, Carbono...).
- Deficiencia de micro-nutrientes (Zn, Fe, Mg, Mn...).
- OD bajo (Inferior a 1 mg/L).
- Edad del lodo (viejo).
- pH bajo (Por debajo de 6,5 unidades se tiene presencia de Hongos filamentosos).
- Presencia y acumulación de sustancias tóxicas.
- Gradientes de temperatura.





# 2. Problema de investigación



\*Environmental Leverage

Greengold Energy Ltd, USA.

## 2.2. Escala real



QM Environmental Services Ltd, USA.





# 2. Problema de investigación



## 2.3. Escala laboratorio



# 3. Aporte de la investigación

Table 7. Effectiveness of the technical solutions

	Number of cases	Number of successes (%)
Contact zone	2	2(100)
Nutrients addition	8	7 (88)
Anti-foaming addition	7	6 (86)
Coagulant addition	33	24 (73)
Reduced sludge concentration	55	40 (73)
Reduced oxygen concentration	30	19 (63)
Mechanical removing of foam	27	17 (63)
Oxidant addition	21	13 (62)
Increased oxygen concentration	22	13 (59)
Increased sludge concentration	20	11 (55)

## Caso: Planta de Parma, Italia

The study has been carried out during September 2006–January 2007 at Wastewater Treatment Plant Constanța Sud and it had the aim to identify main microorganisms responsible for bulking upsets. A comparative survey of abundance and size of floc-forming and filamentous bacteria has revealed that proportion of these bacterial groups could significantly change at different sludge volume index (SVI) values. Dominant filamentous bacteria have been identified as Eikelboom type 0041, *Nostocoida limicola*, and *Sphaerotilus natans*. It seemed that their proliferation would be supported by oxygen fluctuations and fully mixed operational mode of the treatment plant.

## Caso: Planta de Constanta Sud, Romania.

Plant	MCRT <sub>d</sub>	DBO:N:P	SVI <sub>d</sub> mL/g	F/M <sub>kg BOD5/kg MLVSS d</sub>
Domestic	18	100:3:0.5	230	0.09
Domestic	20	100:1:1	250	0.12
Tannery	24	100:5:0.4	300	0.08
Textile	12	100:2:1	270	0.2
Textile	18	100:1:0.5	290	0.05
Domestic	22	100:2:0.5	300	0.16
Meat	20	100:2:1	260	0.09
Pharmaceutical	15	100:1:0.9	310	0.1
Gelatine	22	100:5:0.6	300	0.12
Brewery	11	100:3:0.5	340	0.2

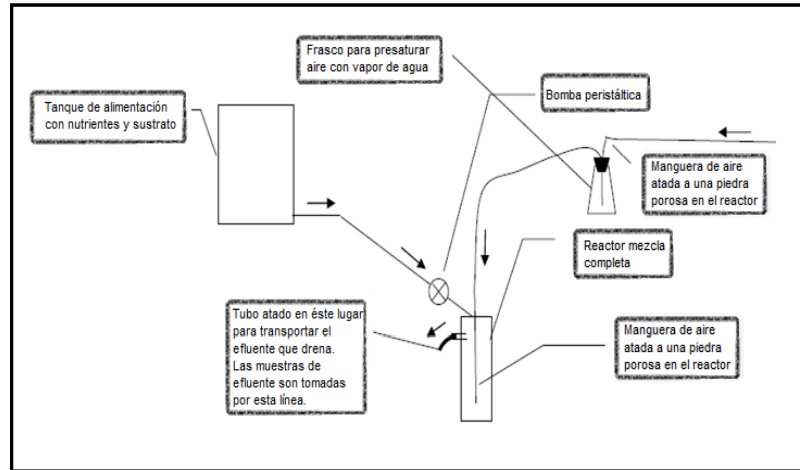
## Caso: Planta de Buenos Aires, Argentina



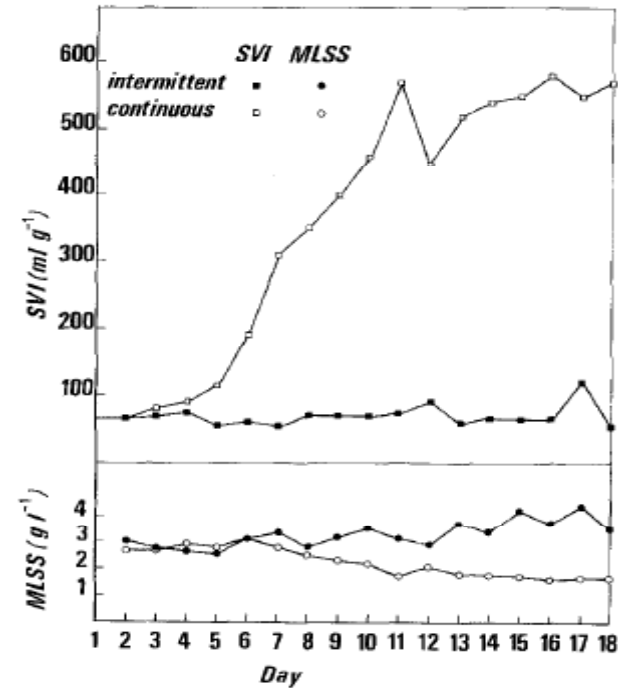
\$3.5 millones

## Caso: PTARI Estado de Toluca, México

# 3. Aporte de la investigación



Caso: Universidad de Delaware, USA



Caso: Universidad de Leuven, Bélgica



Caso: Universidad de Antioquia, Colombia

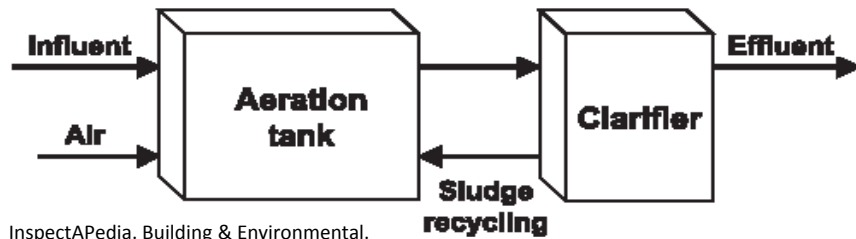


Caso: Universidad de Medellín, Colombia

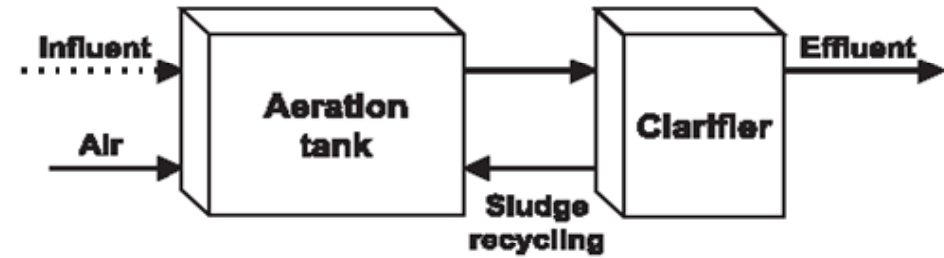


# 4. Hipótesis

## 4.1. Tipo de alimentación

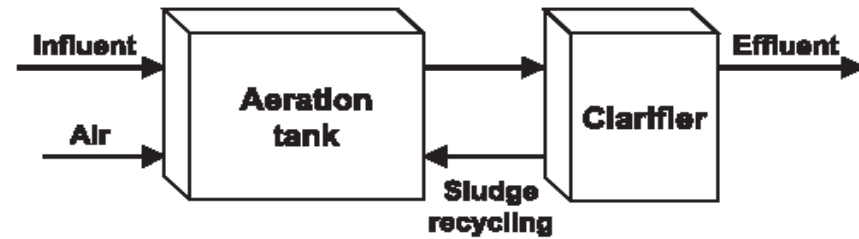
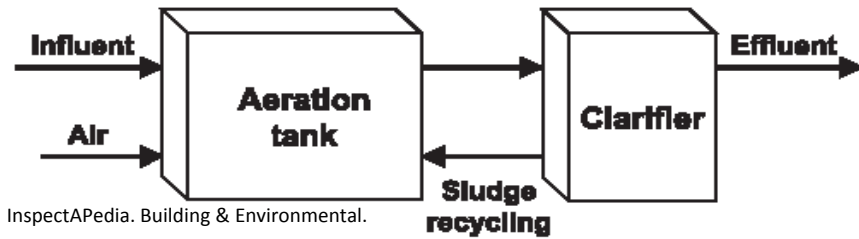


InspectAPedia. Building & Environmental.



# 4. Hipótesis

## 4.2. Cantidad de inóculo

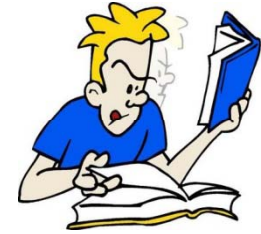


InspectAPedia. Building & Environmental.



# 5. Marco teórico

## 5.1. Tipo de alimentación



Activated Sludge Bulking : A Review of Causes and Control Strategies

*Hossain, F.*

Effect of feeding pattern and storage on the sludge settleability under aerobic conditions

*Antonio M.P. Martins y compañía*

Alternating anoxic feast/aerobic famine condition for improving granular sludge formation in sequencing batch airlift reactor at reduced aeration rate

*Wan JunFeng y compañía*

The Effect of Selectors and Reactor Configuration on Filamentous Sludge Bulking Control in Activated Sludge

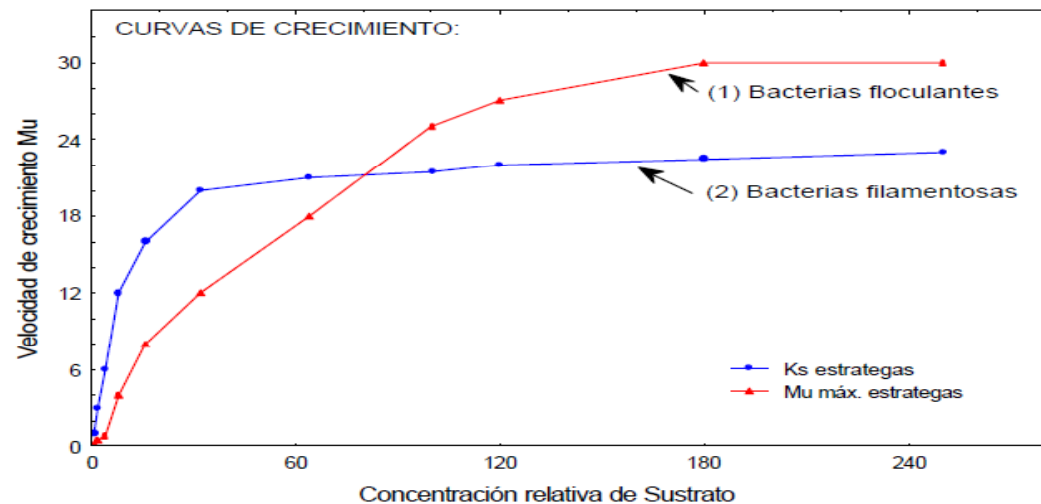
*Ali Akbar Asimi y compañía*

Relations Between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes

*H Verachtert y compañía*

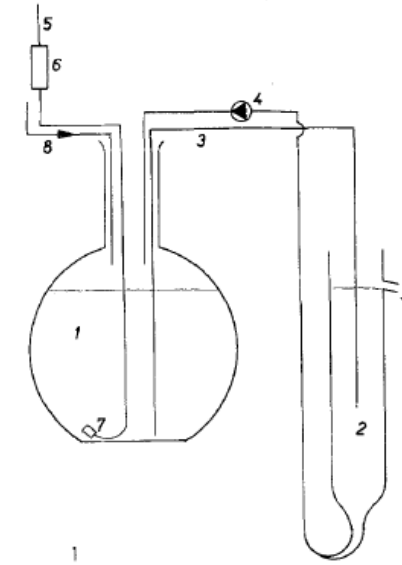
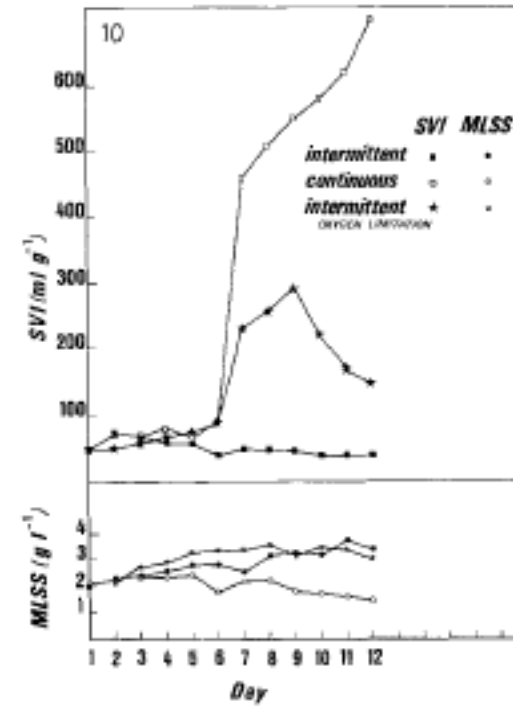
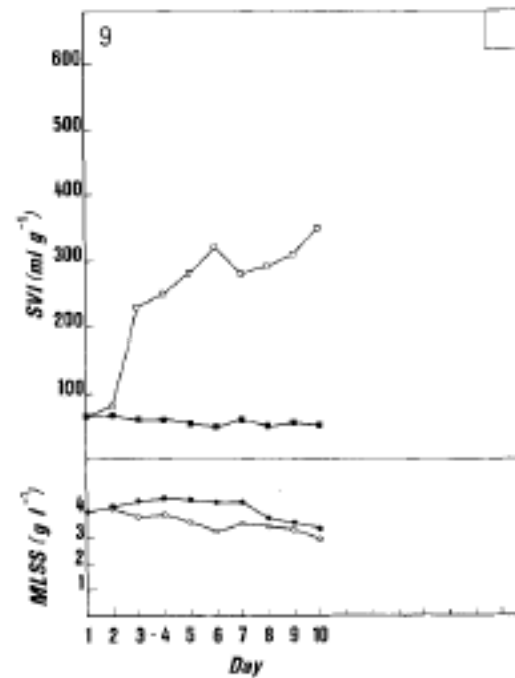
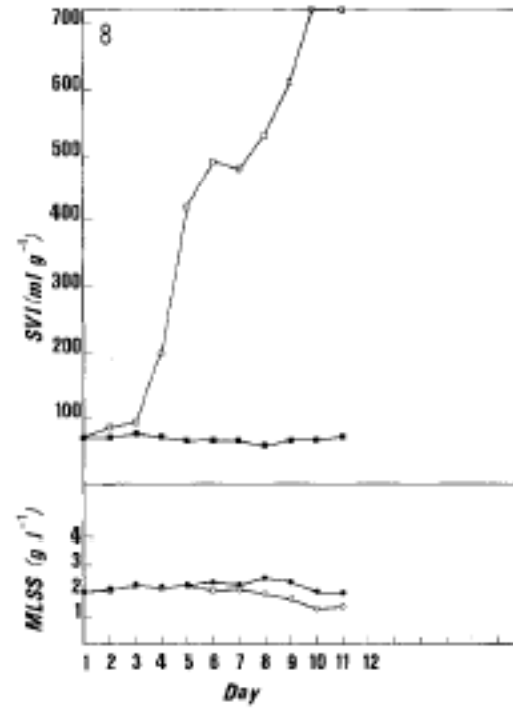
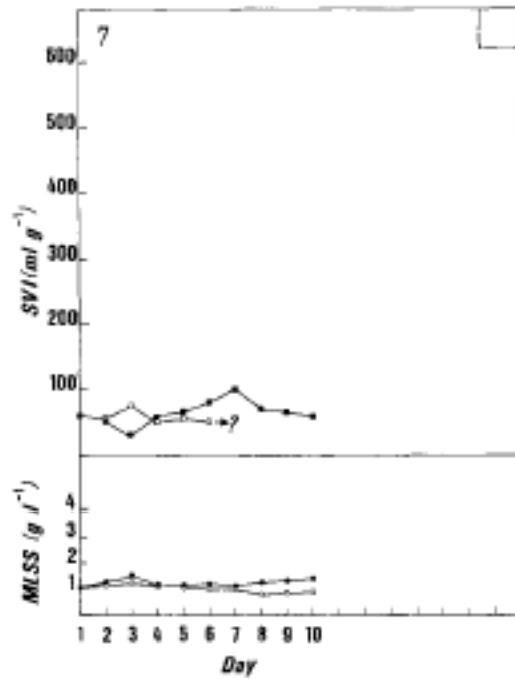
PERFORMANCE AND DESIGN OF A SELECTOR FOR BULKING CONTROL

*Jerzy Patoczka y compañía*



# 5. Marco teórico

## 5.1. Inóculo



*Relations Between Substrate Feeding Pattern and Development of Filamentous Bacteria in Activated Sludge Processes.*

J. Houtmeyers y colaboradores



# 6. Objetivos

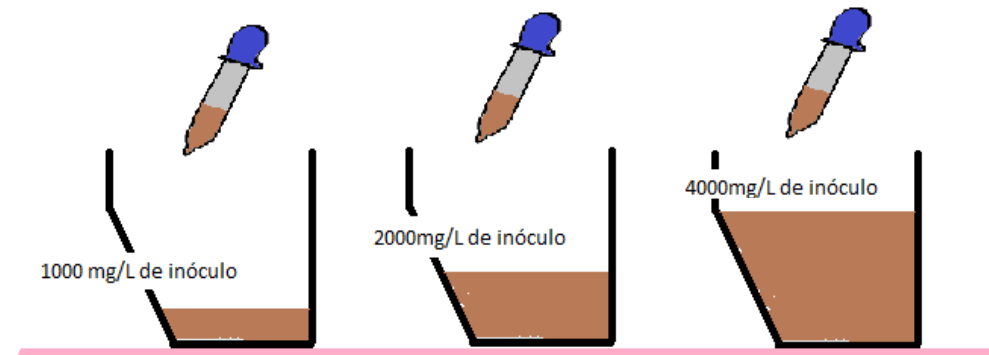
*“Comprobar, a escala de laboratorio, los **efectos de la forma de alimentación [...] y la cantidad de inóculo** sobre el hinchamiento de los lodos de reactores aerobios de mezcla completa en **etapa de arranque.**”*

Objetivo específico 1:



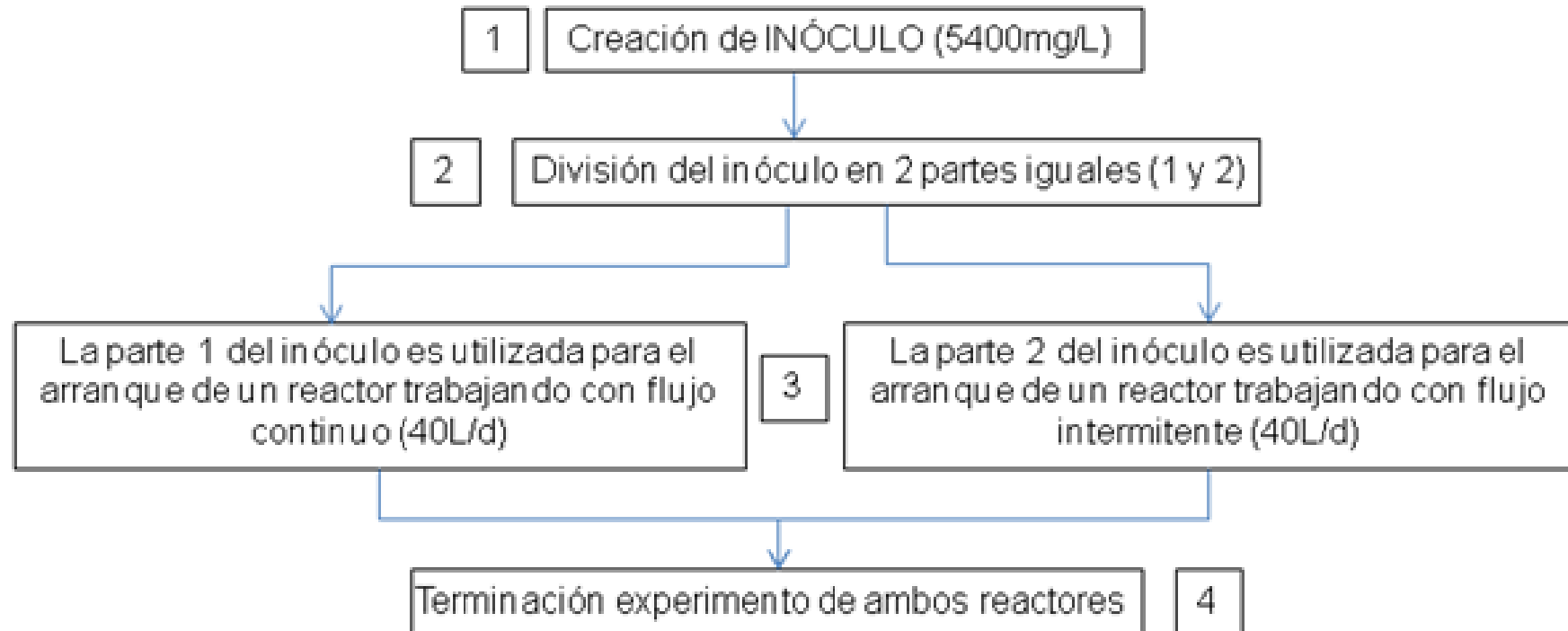
Fase 1

Objetivo específico 2:



Fase 2

# 7. Metodología (Fase 1)



PRIMERA FASE				
Nombre del reactor	Inició	Finalizó	Flujo	Cantidad de inóculo (mg SST/L)
R1	11-Jun-10	25-Jun-10	Continuo	2700
R2	11-Jun-10	25-Jun-10	Intermitente	2700



# 8. Resultados (Fase 1)

SST = 2700 mg/L



SST = 2700 mg/L

SST = 1850 mg/L

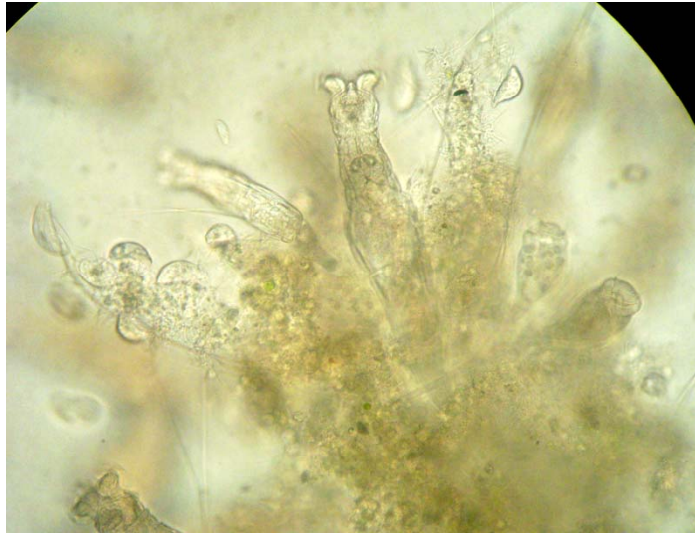


SST = **250 mg/L**

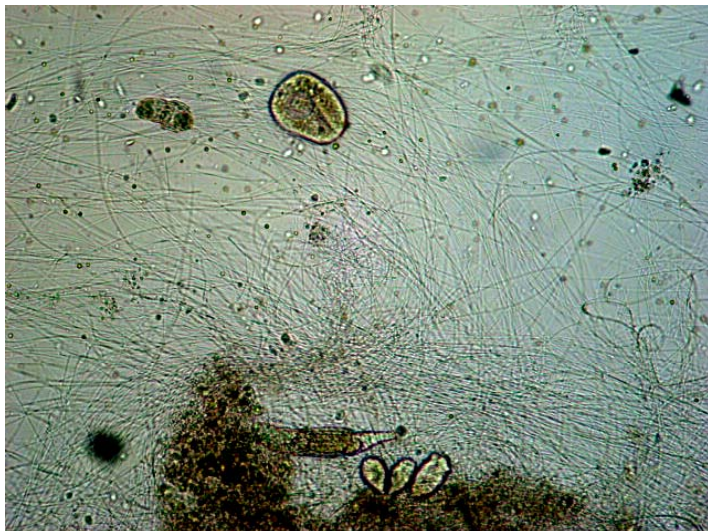
# 8. Resultados (Fase 1)

R1

IVL = 50 g/mL



IVL = **800 g/mL**



R2

IVL = 50 g/mL



IVL = 130 g/mL

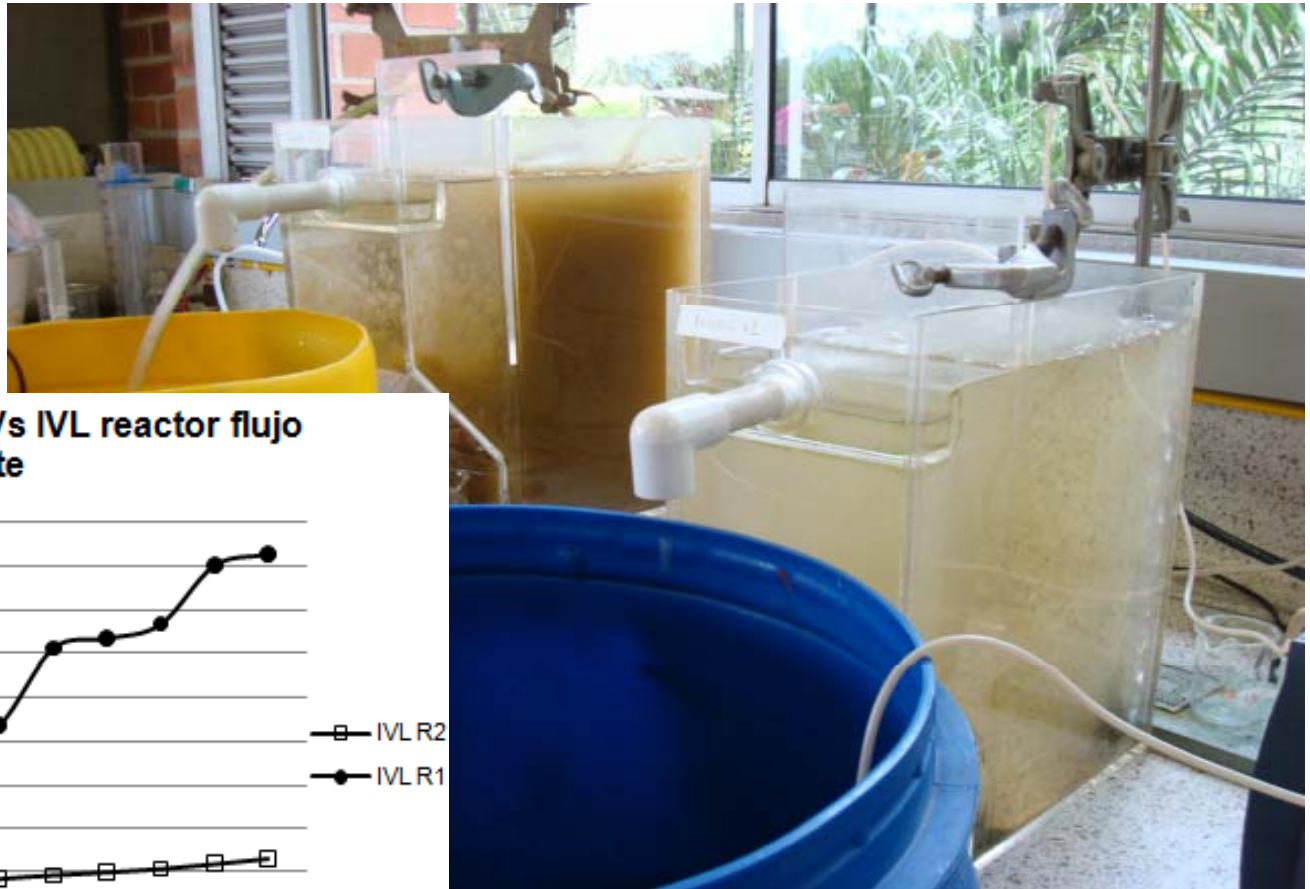




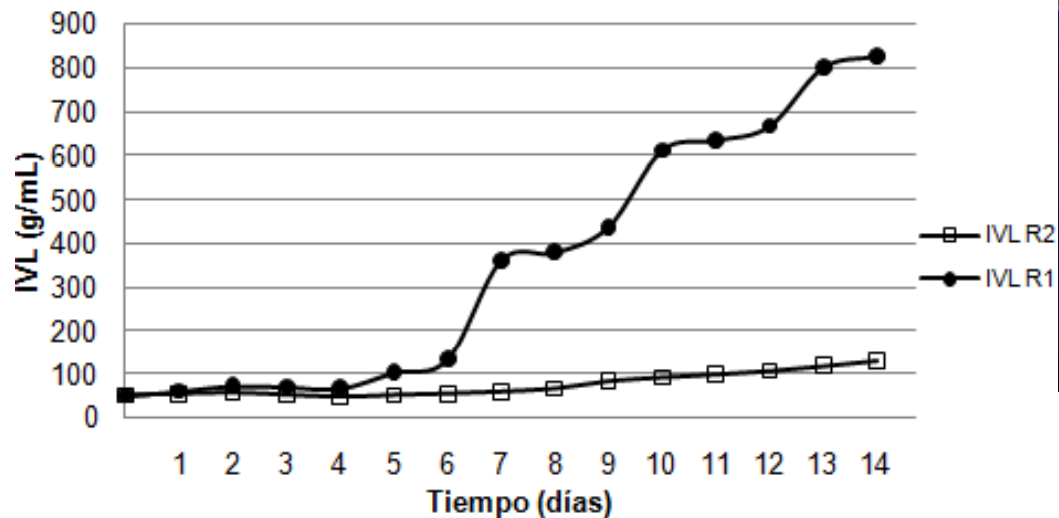


# 9. Conclusiones (Fase 1)

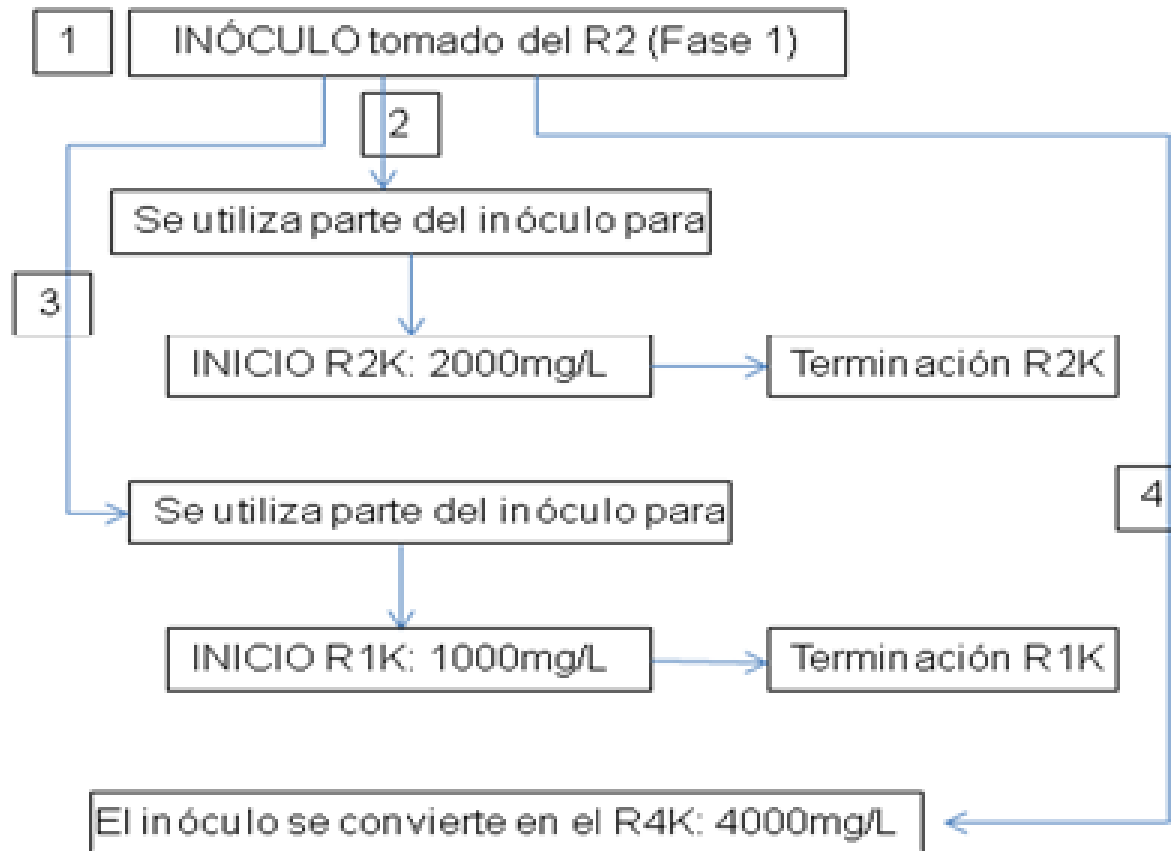
“El hinchamiento del lodo [...] puede prevenirse empleando un régimen de **flujo de alimentación intermitente...**”



IVL reactor flujo continuo Vs IVL reactor flujo intermitente



# 10. Metodología (Fase 2)



FASE 2				
Nombre del reactor	Inició	Finalizó	Flujo	Cantidad de inóculo (mg/L)
R2k	13 de Julio	20 de Julio	Continuo	2000
R1k	22 de Julio	29 de Julio	Continuo	1000
R4k	30 de Julio	6 de Agosto	Continuo	4000

# 11. Resultados (Fase 2)

R1K



SST = 1000 mg/L



SST = 668 mg/L



R2K



SST = 2000 mg/L



SST = **320 mg/L**



R4K



SST = 4000 mg/L



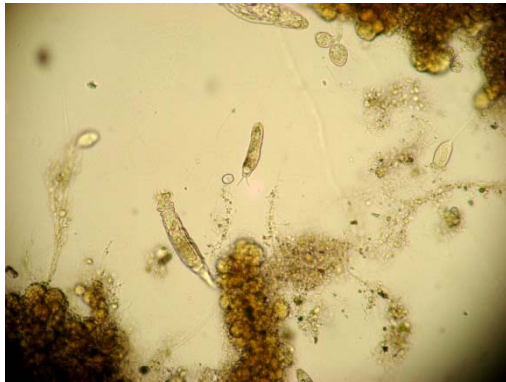
SST = 3380 mg/L





# 11. Resultados (Fase 2)

R1K

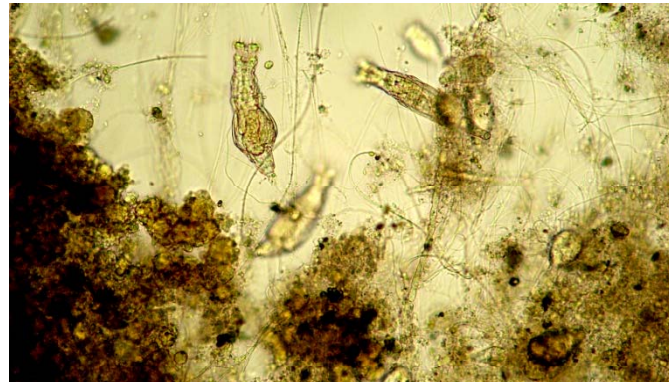


IVL = 150 g/mL

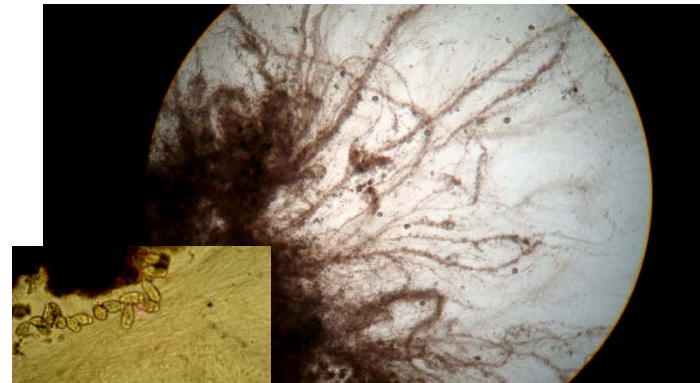


IVL = 180 g/mL

R2K

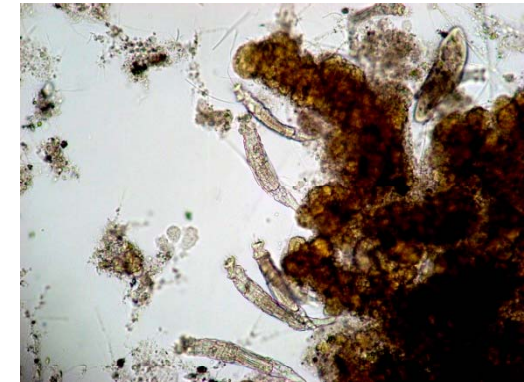


IVL = 139 g/mL

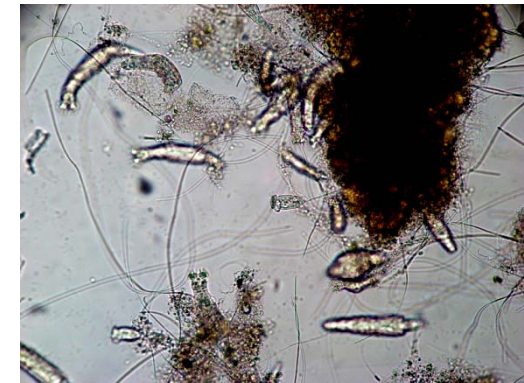


IVL = **3125 g/mL**

R4K

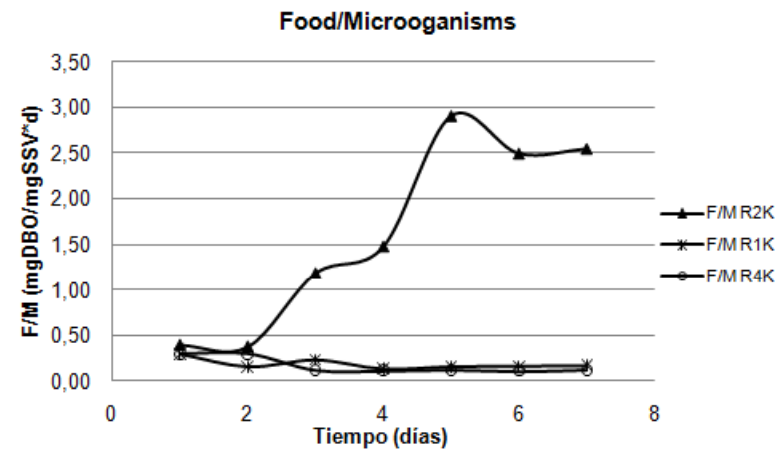
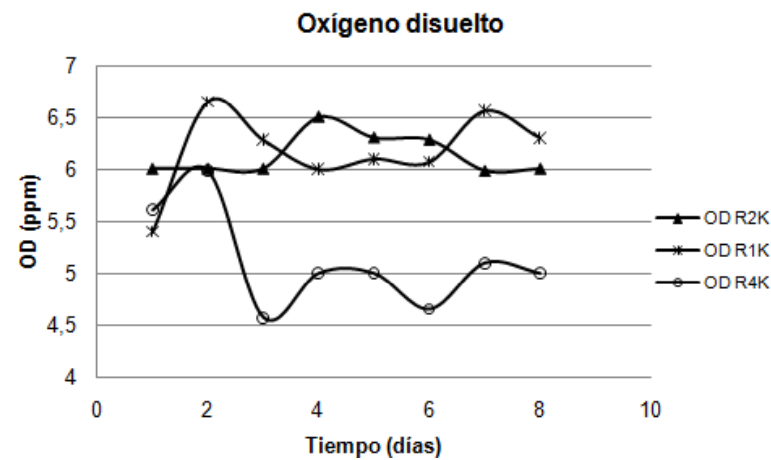
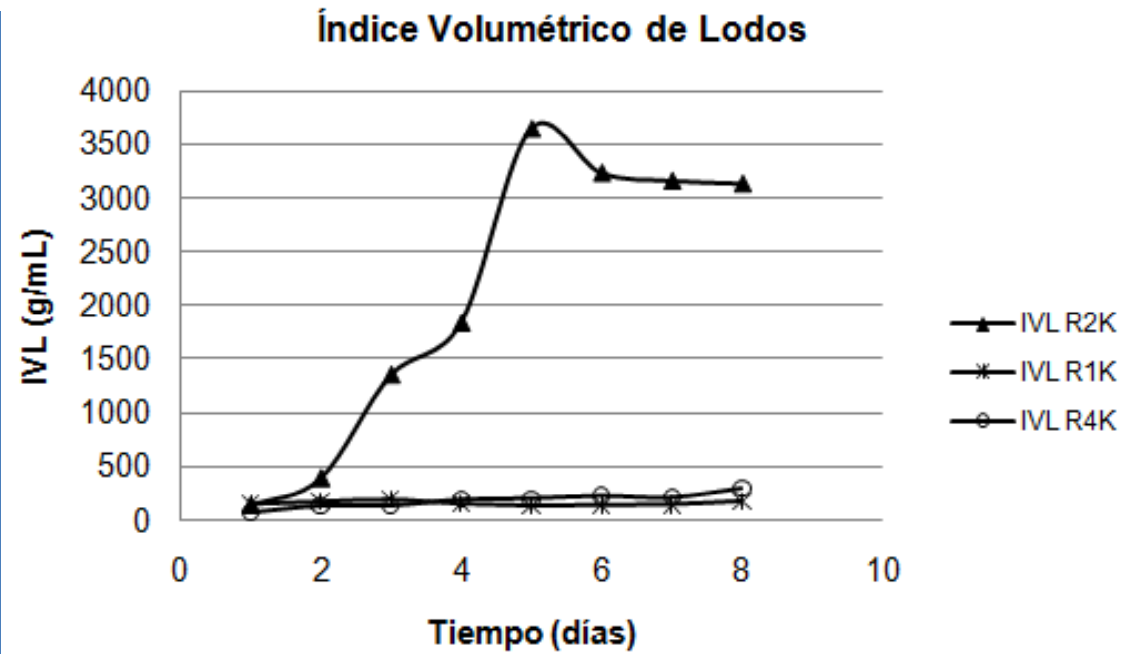
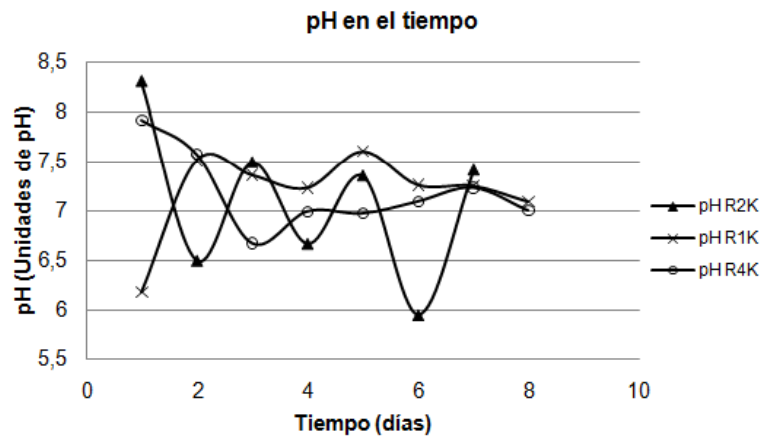


IVL = 73,5 g/mL



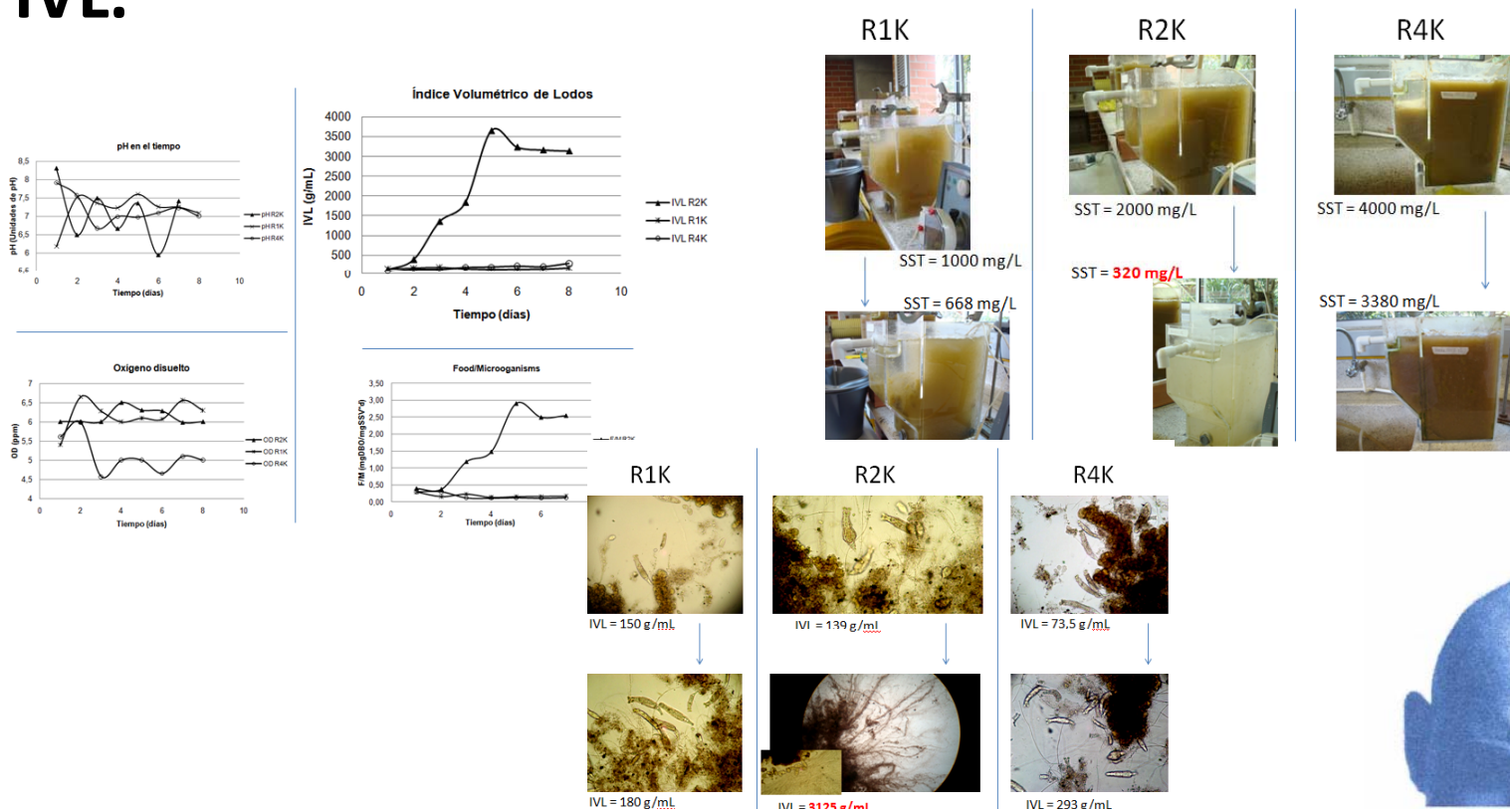
IVL = 293 g/mL

# 11. Resultados (Fase 2)



# 12. Conclusiones (Fase 2)

“...no parece haber alguna relación entre la cantidad de inóculo empleado [...] y el tiempo transcurrido para la aparición de bacterias filamentosas y el empeoramiento del IVL.”





# 13. Productos

## 13.1. Videos



**Filamentous Bulking Studies**  
Canal de jdlopezh

Todos **Videos subidos** Favoritos Organizar subidas

Buscar

Fecha en que se añadió ▼ | Más vistos | Más valorados

**Bioreactor with filamentous bulking**  
7 reproducciones - hace 1 semana

**Bioreactor**  
5 reproducciones - hace 1 semana

**Bioreactor problem**  
13 reproducciones - hace 1 semana

**MOV01058**  
4 reproducciones - hace 1 semana

**Vorticella sp.**  
9 reproducciones - hace 1 semana

**Daphnia pulex 3**  
1 reproducciones - hace 1 semana

**jdlopezh**  
Los visitantes de tu canal verán enlaces aquí, como "suscribirse" y "añadir como amigo".

**Perfil** [editar](#)

Reproducciones del canal:	193
Reproducciones totales de videos subidos:	405
Edad:	22
Antigüedad:	15 de febrero de 2009
Última fecha de visita:	hace 1 día
Suscriptores:	1
País:	Colombia
Profesión:	Estudiante

**Bioreactor with filamentous bulking**  
De: jdlopezh | 06 de febrero de 2011 | 6 reproducciones  
Bench-scale and full mixed aerobic reactor with filamentous bulking and floating sludge in the clarifier due to nitrogen bubbles.  
Reactor aerobio meso-escala completa a escala de laboratorio con bulking filamentoso y lodo flotante en el clarificador debido a

Me gusta



# 13.1. Videos

[Explorar](#)[Subir](#)

## Resultados de búsqueda de bulking filamentoso

Aproximadamente 3 resultados

[Opciones de búsqueda](#)

Traducir resultados a mi idioma



### Bulking filamentoso

A couple of aerobic bench scale lab reactors, treating synthetic wastewater. The only difference between them is the type of feed. The first one ...

by [jdlopezh](#) | hace 7 meses | **147 reproducciones**



### Bioreactor with filamentous bulking

Bench-scale and full mixed aerobic reactor with filamentous **bulking** and floating sludge in the clarifier due to nitrogen bubbles. Reactor aerobio ...

by [jdlopezh](#) | hace 1 semana | **5 reproducciones**



### Bioreactors

trabaja bajo alimentación intermitente o "por pulsos". 16-june-2010 ... filamentous **bulking** synthetic wastewater agua residual sintética **filamentoso** ...

by [jdlopezh](#) | hace 7 meses | **168 reproducciones**



### Eating weeds, wild foods, survival foods.

[EatTheWeeds: Episode 26: Yucca filamentosa](#)

[Shoshanna's Kitchen - Episode 23 - Wild Cherry Cough Wine](#)

[EatTheWeeds: Episode 01: Why Learn About Wild Foods](#)

by [R.IRORRILIO](#) | **Videos: 91**

# 13.1. Videos



filamentous bulking

Buscar

Explorar

Subir

## Resultados de búsqueda de filamentous bulking

Aproximadamente 6 resultados

☰ Opciones de búsqueda



[Traducir](#) rotifer ingesting filamentous bacteria in activated sludge m  
1v

Video clip shows a rotifer *Lecane inermis* ingesting filamentous bacteria in the activated sludge sample. Potential of rotifers to control bulking ...

by PAJDAKSTOS1 | hace 1 año | 1323 reproducciones



**Bioreactor with filamentous bulking**

Bench-scale and full mixed aerobic reactor with filamentous bulking and floating sludge in the clarifier due to nitrogen bubbles. Reactor aerobio ...

by jdlopezh | hace 1 semana | 5 reproducciones



[Traducir](#) sedimentation test with filamentous bulking

An example of filamentous bulking in a bench-scale and full mixed aerobic reactor. After 30 minutes of sedimentation of 1 Liter of activated sludge ...

by jdlopezh | hace 1 semana | 7 reproducciones



**Bulking filamentoso**

A couple of aerobic bench scale lab reactors, treating synthetic wastewater. The only difference between them is the type of feed. The first one ...

by jdlopezh | hace 7 meses | 147 reproducciones

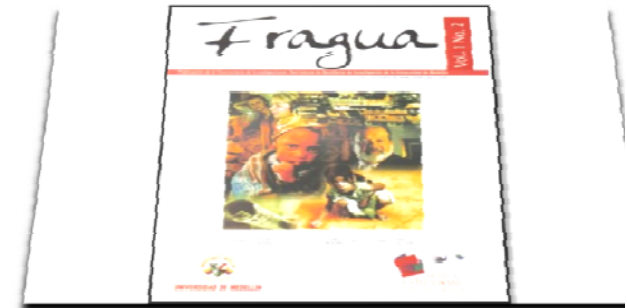


**Bioreactors**

trabaja bajo alimentación intermitente o "por pulsos". 16-june-2010 ... filamentous bulking synthetic wastewater agua residual sintética filamentoso ...

by jdlopezh | hace 7 meses | 168 reproducciones

# 13.2. Artículo



Revisión breve del hinchamiento de lodos en el tratamiento de aguas residuales<sup>1</sup>

Por: Juan David López Hincapié<sup>2</sup> y Liz Arango Muñoz<sup>3</sup>

Universidad de Medellín

Resumen

El hinchamiento de lodos<sup>4</sup> es un problema relacionado a lodos [activados, y su aparición se le atribuye, en mayor medida, a afluentes industriales con deficiencias nutricionales (falta de macro<sup>5</sup> o micronutrientes<sup>6</sup>, baja relación F:M<sup>7</sup>, etc). También se evalúan variables como la edad de los lodos<sup>8</sup>, la aireación, el pH, gradientes de temperatura, y la presencia de sustancias tóxicas.

La mayor cantidad de trabajos e investigaciones respecto al tema se han realizado a nivel internacional. En el tratamiento de aguas en Colombia, el hinchamiento de lodos es apenas una situación desfavorable que se suele combatir con la adición

<sup>1</sup> Este artículo nace del trabajo de grado en curso "Estudio a escala de laboratorio de los efectos de la forma de alimentación y del uso de inóculo sobre el hinchamiento de los lodos de reactores aerobios de mezcla completa en etapa de arranque" para optar por el título de Ingenieros Ambientales de la Universidad de Medellín.

<sup>2</sup> Estudiante de décimo semestre del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Grupo GEMA, línea: Calidad y alternativas para el tratamiento de aguas. CL 42 CRA 74 - 39 int 201, [jdlopezh@gmail.com](mailto:jdlopezh@gmail.com)

<sup>3</sup> Estudiante de décimo semestre del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Grupo GEMA, línea: Calidad y alternativas para el tratamiento de aguas. Circ 73A # 34A - 50, [liarango2@gmail.com](mailto:liarango2@gmail.com)

<sup>4</sup> También llamada "Biomasa" es el conjunto de aglomerados orgánicos e inorgánicos. Microbiológicamente está compuesto principalmente por bacterias, protozoos, metazoos y hongos.

<sup>5</sup> Calcio, Magnesio y Hierro como los más representativos.

<sup>6</sup> Azufre, Cobalto, Manganeso, Zinc, Selenio, Níquel, Boro, Cobre y Molibdeno como los más representativos.

<sup>7</sup> Relación Comida Microorganismos, por su traducción del inglés *Food:Microorganisms ratio*.

<sup>8</sup> Entiéndase también como Tiempo de Retención Celular, o *Mean Cellular Retention Time*.

de agentes químicos. La falta de una búsqueda profunda sus causas de aparición, representa una constante e innecesaria inversión de recursos para su control. No tener información disponible indica un mayor atraso frente al tema a nivel Nacional.

**Palabras clave:** Hinchamiento de lodos, Esponjamiento de lodos, Bulking filamentoso, tratamiento de aguas residuales, lodos activados.

**Brief review on the filamentous bulking in the wastewater treatment**

**Abstract**

Filamentous Bulking is a very common problem related to the activated sludge in the wastewater treatment. The industrial effluents are very sensitive to this problem, especially those with a lack of nutrients (micronutrients, or low F:M relationship). There are also several parameters to check when trying to solve the bulking problem, like sludge age, aeration, pH and the presence of toxic wastes.

The biggest quantity of paperwork, experiences and investigations around the filamentous subject, are taking place in an international level. In Colombia, the filamentous bulking is solved with chemical agents, with no looking forward on the filamentous microorganisms. The absence of an intense review of the real causes of the problem represents an unnecessary but constant cost to the wastewater treatment plants. The lack of information on a regional level shows a worst panorama, where Colombia is once again, delayed in scientific investigations.

**Key words:** filamentous bulking, wastewater treatment, activated sludge.



UNIVERSIDAD DE MEDELLIN

## 13.3. Exposiciones



VIII Encuentro Regional de Semilleros de Investigación, Nodo Antioquia. SIU, Abril de 2009, Medellín.



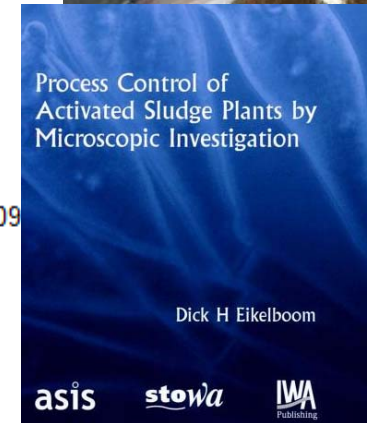
XII Encuentro Nacional y VI Internacional de semilleros de Investigación RedCOLSI, Universidad Agustiniana, Octubre de 2009, Bogotá.

# 13.4. Contactos



## Identity, abundance and ecophysiology of filamentous bacteria belonging to the *Bacteroidetes* present in activated sludge plants

Caroline Kragelund<sup>1</sup>, Caterina Levantesi<sup>2</sup>, Arjan Borger<sup>3</sup>, Karin Thelen<sup>4</sup>, Dick Eikelboom<sup>5</sup>, Valter Tandoi<sup>2</sup>, Yunhong Kong<sup>1</sup>, Janneke Krooneman<sup>6</sup>, Poul Larsen<sup>1</sup>, Trine Rolighed Thomsen<sup>1</sup> and Per Halkjær Nielsen<sup>1</sup>



★ de **Dick Eikelboom** <eikelboom@asisludge.com>  
para Juan David López Hincapié <jdlopezh@gmail.com>  
fecha 12 de agosto de 2009 09:39  
asunto Re: from Colombia

[ocular detalles](#) 12/08/09

Dear Juan David,

I am afraid that I cannot help you. Applying staining is essential for filament identification. The only alternative is FISH, which is even more complicated.

When your reactor is fed with industrial wastewater, numerous tiny filamentous species might grow. For more information about this subject, you are referred to the DVD "identification and control of filamentous micro-organisms in industrial wastewater treatment plants", see [www.iwapublishing.com](http://www.iwapublishing.com)

Kind regards,  
Dick H. Eikelboom  
ASIS vof  
Deventerweg 38  
7203 AK Zutphen  
The Netherlands  
[www.asissludge.com](http://www.asissludge.com)





# 13.4. Contactos

## First results from a screening of filamentous organisms present in Buenos Aires's activated sludge plants

W.D. Di Marzio

Programa de Investigación en Ecotoxicología, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján. Rutas 5 y 7 s/n 6700 Luján. Argentina (E-mail: [labetox@mail.unlu.edu.ar](mailto:labetox@mail.unlu.edu.ar))

**Abstract** Activated sludge samples from municipal and industry plants were evaluated with the aim to recognise the mainly filamentous bacteria found. The routine tests recommended were performed: Gr: Neisser, PHB-Nilo blue epifluorescence reaction and S. The morphologic characteristics were determined. Correlation between environmental conditions and abundance of dominant bacteria were made. All plants were completely mixed configurations with anoxic reactor for denitrification ahead of main aerobic reactor. Also all systems were working at low F/M values or high sludge age (> ten days) and in some cases with low oxygen concentration. The dominant species were Type 021N, Thiothrix I, *Sphaerotilus natans*, *Microthrix parvicella*, *Nocardia* sp, Type 1701, Type 1863, Type 0041 and Type 0092.

**Keywords** Activated sludge plants; Argentina; filamentous microorganisms

## CONTROL DE ORGANISMOS FILAMENTOSOS MEDIANTE SELECCIÓN CINÉTICA Y METABÓLICA EN SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS

Walter Di Marzio, María Elena Sáenz, María del Carmen Tortorelli y José Luis Alberdi

★ de **dimarzio** <[dimarzio@speedy.com.ar](mailto:dimarzio@speedy.com.ar)>  
para **Juan David López Hincapié** <[jdlopezh@gmail.com](mailto:jdlopezh@gmail.com)>  
fecha 13 de mayo de 2009 12:57  
asunto RE: Universidad de Medellín  
enviado por [speedy.com.ar](http://speedy.com.ar)

[ocultar detalles](#) 13/05/09

Hola,

Se podría volver a la alimentación continua para corroborar que el **bulking** estuvo debido a esa causa.

Si es así, lo que puede haber sucedido es que el tiempo de "contacto" bacteria – DBO haya cambiado y hayan conseguido un selector virtual. De todos modos habría que ver qué bacteria filamentosa tuvieron.

Saludos,

Walter di Marzio



# 13.4. Contactos

## SURCIS participation in the Bioindication course of Hydrolab Microbiologica in Spain

Respirometry and Bioindication are going again together in the Microscopic Bioindication course organized by HYDROLAB MICROBIOLOGICA.

This course will take place in Barcelona from the 18 to the 21 of May.

It is about a practical course where each student will be provided by one independent microscope where he can analyze the activated sludge samples. As newness, it incorporates a practical session of Respirometry that will take place with a BM respirometer from SURCIS, that will be carried out by Emilio Serrano (Product Manager of SURCIS) and Josep Xavier Sensada (Técnical Manager of SURCIS).

For more information and inscription: [www.hydrolab.es](http://www.hydrolab.es)

★ de **Emilio Serrano** <[eserrano@surcis.com](mailto:eserrano@surcis.com)>  
para Juan David López Hincapié <[jdlopezh@gmail.com](mailto:jdlopezh@gmail.com)>  
fecha 15 de mayo de 2009 10:03  
asunto Re: Universidad de Medellín  
enviado por [surcis.com](http://surcis.com)

[ocultar detalles](#) 15/05/09

Responder

Estimado Juan David,

Como habrás podido comprobar en el proceso de fangos activos una de las causas de aparición de filamentosas es el desequilibrio de la carga másica: Al alimentar por tandas, lo que has hecho es reducir la carga másica media.

En ausencia de productos de carácter tóxico, si se opera a la carga másica & edad del fango y en las condiciones físico-químicas adecuadas (pH medio 7,5 - OD medio 2 ppm - Temperatura > 15 °C, conductividad < 7000 µS/cm) no tiene por qué desarrollarse el **bulking filamentoso** con una alimentación continua.

$$1/TRC = F/M * Y_H - K_d$$

TRC (d): Edad del fango

Y<sub>H</sub>: Coeficiente de crecimiento de la biomasa heterótrofa

K<sub>d</sub> (d): Fracción de MLVSS por día oxidada durante la respiración endógena.

Todos los valores de la ecuación que relaciona TRC con F/M deberían determinarse por Respirometría; pero si ello ahora no es posible, puedes tratar de encontrar tablas adecuadas por Internet.

Adjunto un manual de aplicaciones del respirómetro desarrollado por nuestra empresa Surcis.

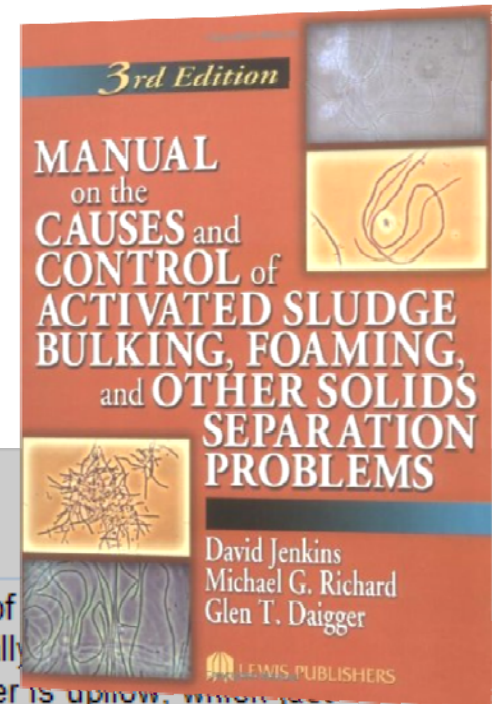
Un cordial saludo,

Emilio Serrano  
SURCIS, S.L.



# 13.4. Contactos

David Jenkins



flocdoc

Full Member

\*\*\*

Offline



Water and  
Wastewater.com is  
the best!

Posts: 130

Gender: ♂

Company or Organization: U  
C Berkley

Re: Bulking on an aerobic full-mixed lab-scale  
reactor  
Reply #6 - Oct 16<sup>th</sup>, 2009, 1:06pm

Apart from the previous comments I would like to add that the type of  
about the worst for handling a poorly settling sludge. You have virtually  
rate of mixed liquor to the clarification area and the flow in the clarifier is upflow, which  
exacerbates the settling problems. You need to have a separate clarifier from which you can pump  
return sludge back to the reactor. You need to split the mixing and aeration functions (use a mixer  
for mixing and an aerator for aeration). You need to do something to get away from a complete  
mix, continuously fed aeration basin ie use a compartmentalized aeration basin or an intermittent  
feed...welcome to the wonderful world of lab activated sludge units! There is one consolation  
however...if you decide to go in to activated sludge operation as a career then you will find that the  
full scale plants are a lot easier to operate than the lab units!

Good luck

David Jenkins

Back to top





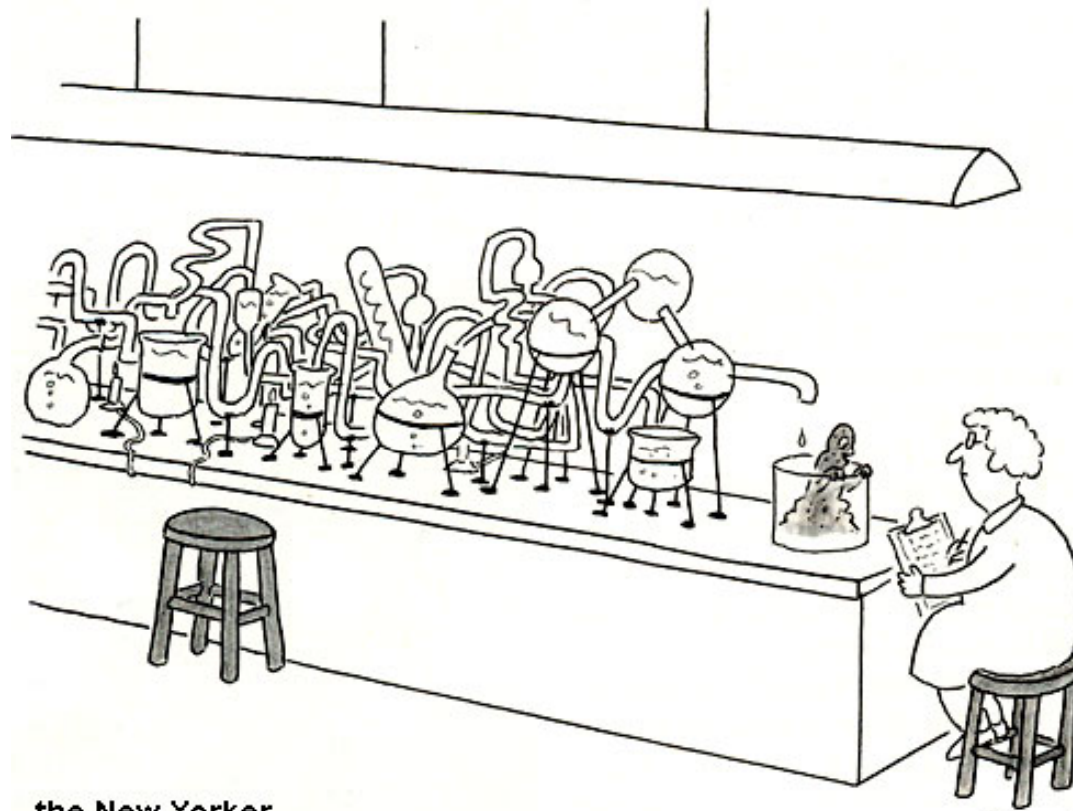
# 14. Bibliografía

- Paolo Madoni y colaboradores. *Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated-sludge plants*. Italy, Pergamon. Noviembre de 1999.
- Thelma Beatriz Pavón Silva. *Efecto y control de esponjamiento de lodos en una tratadora de aguas residuales industriales*. Toluca, México. 2000.
- N Lacko, F Bux y colaboradores. *Survey of filamentous bacteria in activated sludge plants in KwaZulu-Natal*. KwaZulu Natal. 1998.
- W.D. DiMarzio. *First results from a screening of filamentous organisms present in Buenos Aires's activated sludge plants*. Buenos Aires, Argentina. 2002.

# 14. Cibergrafía

- Bulking on an aerobic full-mixed lab-scale reactor. 2009. Wastewater forum.  
<http://www.waterandwastewater.com/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?num=125555214>
- Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems. 2004.  
[http://books.google.com/books?id=1UO5\\_bmHOEQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summar\\_y\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com/books?id=1UO5_bmHOEQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summar_y_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Surcis News. 2010. <http://www.surcis.com/pdf/noticias/news.pdf>
- Determinación de la fracción de nutrientes por respirometría. Emilio Serrano. 2000.  
<http://www.surcis.com/Fraccionamiento de Nutrientes por Respirometria.pdf>
- Control de organismos filamentosos mediante selección cinética y metabólica en sistemas de lodos activados. Walter Di Marzio. 2000.  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/argentina11/selcinemet.pdf>
- Activated Sludge Information Systems. 2010.  
<http://www.asissludge.com/>
- City of Fairfield. 2011.  
<http://www.fairfield-city.org/wastewater/index.cfm>

# Muchas gracias!



the New Yorker  
Sep 18, 2006  
pg 77

*"Are you my mommy?"*

S. GROSS

04. Anexo2. txt

Para consultar videos sobre el montaje en el laboratorio y observaciones al microscopio, dirigirse a:

[www.youtube.com/jdllopezh](http://www.youtube.com/jdllopezh)