

**ARRANQUE DE REACTORES ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE
(UASB) A ESCALA DE LABORATORIO SIMULANDO DOS CONDICIONES DE
FLUJO EN LA ENTRADA**

SERGIO ANDRES NARANJO JEREZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2013**

**ARRANQUE DE REACTORES ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE
(UASB) A ESCALA DE LABORATORIO SIMULANDO DOS CONDICIONES DE
FLUJO EN LA ENTRADA**

SERGIO ANDRES NARANJO JEREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

**Director:
M.Sc. ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2013**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del jurado

Jurado calificador

Jurado calificador

Floridablanca, Abril 18 de 2013

DEDICATORIA

Al Dios que nos vigila, así sea para hacer las cosas bien, por los favores que vienen y vendrán en mi futura vida profesional porque a Él en cualquiera de sus configuraciones le debo todo.

A mis padres por demostrar su apoyo incondicional e interés para que desde niño apreciara esta enriquecedora actividad de aprender sobre las bases teóricas que hoy nos rigen y de la misma vida. Y a su innegable ejemplo de superación que está implícito en mi memoria.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su reconocimiento a:

La Universidad Pontificia Bolivariana y la Facultad de Ingeniería Ambiental por permitirle desarrollar a plenitud los objetivos de este estudio, al poder contar con los medios necesarios para su desarrollo, tanto físicos, económicos como humanos.

El profesor de la Facultad de Ingeniería Ambiental Álvaro Andrés Cajigas Cerón, quien demostró su total apoyo durante las diferentes etapas del proceso y procuro facilitar el buen desempeño de las actividades proyectadas con sus indicaciones teóricas y prácticas.

Los operarios de la PTAR UPB, Alonso Cárdenas Pinilla y Oscar Murallas tras demostrar su respaldo en los requerimientos operativos del proyecto.

Los integrantes del Laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales UPB (Diego Blanco, profesora Claudia Quintero y Felisa Barajas) por haber facilitado inicialmente un espacio para la realización de las pruebas.

Naydu Villamizar, por confiarme un área de trabajo y permitirme seguir el desarrollo habitual de las valoraciones correspondientes al sistema escala laboratorio.

Rubi Castellares por apoyar el desarrollo de ciertas pruebas de laboratorio.

Los amigos y compañeros que permitieron que todo esto fuera posible.

CONTENIDO

INTRODUCCION	14
JUSTIFICACION.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
3. MARCO REFERENCIAL.....	17
3.1 ANTECEDENTES	17
3.2 MARCO GEOGRAFICO.....	18
3.3 MARCO TEORICO.....	19
3.3.1 Características generales en las aguas residuales.....	19
3.3.1.1 Físicas	19
3.3.1.2 Químicas.....	20
3.3.1.3 Biológicas	23
3.3.2 Sistema de tratamiento anaerobio	23
4. METODOLOGIA	41
ETAPA 1. VALORACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD Y CALIDAD DE FLUJO ..	41
ETAPA 2. DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA DE FACTORES DE INHIBICIÓN.....	42
Montaje para la determinación de la Actividad Metanogénica	42
ETAPA 3. EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN FLUJO CONTINUO Y DISCONTINUO DEL PAR REACTORES UASB.....	47
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	52
5.1 ETAPA 1. VALORACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD Y CALIDAD DE FLUJO PTAR UPB.	52
5.2 ETAPA 2. DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA DE FACTORES DE INHIBICIÓN.....	59
5.2.1 Caracterización del inoculo.....	59
5.2.2 Caracterización del sustrato	59
5.2.3 Ensayo AME y Resultados	60

5.3 ETAPA 3. EVALUACION DE LA CONDICION DE OPERACIÓN EN FLUJO CONTINUO Y DISCONTINUO REACTORES UASB.....	64
5.3.1 Fase 1. Operación continua durante el arranque.....	64
5.3.1.1 pH y Alcalinidad (Relación Al/AP) – fase de arranque.....	65
5.3.1.2 Demanda Química de Oxigeno (DQO) – fase de arranque	67
5.3.1.3 Demanda Biológica de Oxigeno (DBO ₅) – fase de arranque	68
5.3.2 Fase 2. Operación continua estable	69
5.3.2.1 pH y Alcalinidad (Relación Al/AP) – fase continua estable	69
5.3.2.2 Ácidos Grasos Volátiles (AGV) – fase continua estable	73
5.3.2.3 Demanda Química de Oxigeno (DQO) – fase continua estable	73
5.3.2.4 Demanda Biológica de Oxigeno (DBO ₅) – Fase continua estable	74
5.3.2.5 Sólidos – fase continua estable	75
5.3.2.6 Fosforo – fase continua estable	77
5.3.2.7 Nitrógeno – fase continua estable	78
5.3.3 Fase 3. Operación continua (E1) y operación discontinua (E2).....	81
5.3.3.1 pH y Alcalinidad (Relación Al/AP) – fase continua (E1) y discontinua (E2).....	81
5.3.3.2 Ácidos Grasos Volátiles (AGV) – fase continua (E1) y discontinua (E2)	83
5.3.3.3 Demanda Química de Oxigeno (DQO) – fase continua (E1) y discontinua (E2).....	84
5.3.3.4 Sólidos – fase continua (E1) y discontinua (E2)	85
5.3.4 Fase 4. Operación discontinua fuerte	88
5.3.4.1 pH y Alcalinidad (Relación Al/AP) – fase discontinua fuerte	88
5.3.4.2 Ácidos Grasos Volátiles (AGV) – fase discontinua fuerte	90
5.3.4.3 Demanda Química de Oxigeno (DQO) – fase discontinua fuerte	91
5.3.4.4 Sólidos – fase discontinua fuerte	92
6. CONCLUSIONES	95
7. RECOMENDACIONES.....	97
BIBLIOGRAFIA.....	98
ANEXOS.....	100

TABLAS

Tabla 1. Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de materia orgánica	25
Tabla 2. Composición típica del biogás	27
Tabla 3. Rangos óptimos de pH para la degradación de ciertos sustratos	31
Tabla 4. TRH recomendados para reactores UASB tratando ARD	34
Tabla 5. Principales criterios de diseño para reactores UASB a escala real	39
Tabla 6. Programación aplicada a lo largo de la depuración	49
Tabla 7. Parámetros de control aplicados para el sistema escala laboratorio	51
Tabla 8. Análisis por dos semanas del afluente sistema PTAR	52
Tabla 9. Análisis por dos semanas del efluente sistema RAP	53
Tabla 10. Resultados preliminares del inóculo abonado para el ensayo AME	59
Tabla 11. Seguimiento del sustrato a aplicar en el ensayo AME	59
Tabla 12. Registros matemáticos AME de las muestras con mayor regularidad	62
Tabla 13. Resultados de los ensayos AME	62
Tabla 14. Condiciones operacionales iniciales reactores UASB	64
Tabla 15. Promedio de los parámetros monitoreados – fase de arranque	68
Tabla 16. Condiciones operacionales reactores UASB durante la “preservación” del flujo estable.	69
Tabla 17. Promedio de los parámetros evaluados con mayor regularidad - fase continua estable	80
Tabla 18. Promedio de los parámetros evaluados con menor regularidad - fase continua estable	80
Tabla 19. Condiciones operacionales reactores UASB durante programaciones continuas y discontinuas	81
Tabla 20. Promedio de los parámetros monitoreados – fase continua (E1) y discontinua (E2)	87
Tabla 21. Condiciones operacionales reactores UASB durante fuertes discontinuidades.	88
Tabla 22. Promedio de los parámetros monitoreados – fase discontinua fuerte	94

FIGURAS

Figura 1. Interrelación de las fracciones de sólidos presentes en las aguas residuales	20
Figura 2. Esquema general de las vías metabólicas generadas por los grupos involucrados en la digestión anaerobia.....	26
Figura 3. Rutas para la formación de metano por fermentación de compuestos complejos.....	26
Figura 4. Influencia de la temperatura en la tasa de crecimiento de la biomasa. ..	29
Figura 5. Organización de los microorganismos en la estructura de un granulo	35
Figura 6. Gránulos observados en un reactor UASB	36
Figura 7. Esquema general de un reactor UASB.....	38
Figura 8. Configuración del ensayo AME.....	44
Figura 9. Bombas dosificadoras utilizadas en el tratamiento.	47
Figura 10. Reactores UASB a escala laboratorio acoplados	48
Figura 11. Lodo sembrado en los reactores UASB.....	49
Figura 12. Lodo asentado previo al inicio formal de las operaciones.....	49
Figura 13. Sistema configurado para la ejecución del tratamiento.....	50
Figura 14. Perfil de llaves acondicionadas en los reactores	50
Figura 15. Comportamiento extendido del flujo en el sistema PTAR UPB.....	54
Figura 16. Comportamiento extendido del pH en el sistema PTAR UPB.....	54
Figura 17. Caudal y pH afluente PTAR UPB (índices mínimos y máximos).	56
Figura 18. pH y caudal efluente PTAR UPB (índices mínimos y máximos).	56
Figura 19. Semana 1 - Sumatoria de volúmenes en tránsito por los reactores anaerobios PTAR UPB.	57
Figura 20. Semana 2 - Sumatoria de volúmenes en tránsito por los reactores anaerobios PTAR UPB	58
Figura 21. Montaje AME sin agitación (reactores batch y receptores de biogas) ..	60
Figura 22. Montaje AME sin agitación en detalle	60
Figura 23. pH en el sistema – fase de arranque	66
Figura 24. Relación AI/AP en el sistema – fase de arranque.....	66
Figura 25. DQO y su remoción en el sistema – fase de arranque	67
Figura 26. DBO ₅ y su remoción en el sistema – fase de arranque.....	68
Figura 27. pH en el sistema – fase continua estable	71
Figura 28. Relación AI/AP en el sistema – fase continua estable.....	72
Figura 29. Ácidos Grasos Volátiles en el sistema – fase continua estable	73
Figura 30. DQO y su remoción en el sistema – fase continua estable.....	74
Figura 31. DBO ₅ y su remoción en el sistema – fase continua estable.....	75
Figura 32. Comportamiento de los sólidos en E1 – fase continua estable.....	76
Figura 33. Comportamiento de los sólidos en E2 – fase continua estable.....	76
Figura 34. Fosforo y su remoción en el sistema – fase continua estable.....	78
Figura 35. Nitrógeno y su remoción en el sistema – fase continua estable	79
Figura 36. Comportamiento del pH – fase continua (E1) y discontinua (E2)	82

Figura 37. Relación AI/AP – fase continúa (E1) y discontinua (E2)	82
Figura 38. Ácidos Grasos Volátiles – fase continúa (E1) y discontinua (E2).	84
Figura 39. DQO y su remoción en el sistema – fase continua (E1) y discontinua (E2).	85
Figura 40. Comportamiento de los sólidos en E1 – en continuidad	86
Figura 41. Comportamiento de los sólidos en E2 – en discontinuidad.....	86
Figura 42. Comportamiento del pH – fase discontinua fuerte	89
Figura 43. Relación AI/AP – fase discontinua fuerte.....	89
Figura 44. Ácidos Grasos Volátiles – fase discontinua fuerte	90
Figura 45. DQO en el sistema – fase discontinua fuerte.....	91
Figura 46. Comportamiento de los sólidos en E1 – fase discontinúa fuerte	93
Figura 47. Comportamiento de los sólidos en E2 – fase discontinúa fuerte	93

ANEXOS

Anexo 1. Semana 1 - Series de monitoreo sistema PTAR UPB (pH y caudal)....	101
Anexo 2. Semana 2 - Series de monitoreo sistema PTAR UPB (pH y caudal)....	102
Anexo 3. Semana 1 - Condiciones de presión y temperatura ensayo AME.....	103
Anexo 4. Semana 2 - Condiciones de presión y temperatura ensayo AME.....	105
Anexo 5. Gráficos y Ecuaciones de la recta ensayos AME	107
Anexo 6. Resultados de laboratorio – Compilación de pH en diversas programaciones (TRH).	110
Anexo 7. Resultados de laboratorio – Compilación de Alcalinidad Parcial (AP) y Alcalinidad Intermedia (AI) en mg/L de CaCO ₃ y su interrelación (AI/AP) en diversas programaciones (TRH).	111
Anexo 8. Resultados de laboratorio – Compilación de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) en diversas programaciones (TRH).	113
Anexo 9. Resultados de laboratorio – Compilación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en diversas programaciones (TRH).	114
Anexo 10. Resultados de laboratorio – Compilación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅) en programaciones iniciales (TRH).	115
Anexo 11. Resultados de laboratorio – Compilación de los Solidos Totales (ST) y Solidos Totales Volátiles (STV) y su interrelación (STV/ST) en distintas programaciones (TRH).	115
Anexo 12. Resultados de laboratorio – Compilación de Fosforo Total en distintas programaciones (TRH).	116
Anexo 13. Resultados de laboratorio – Nitrógeno Total Kjeldahl.....	116

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ARRANQUE DE REACTORES ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) A ESCALA DE LABORATORIO SIMULANDO DOS CONDICIONES DE FLUJO EN LA ENTRADA

AUTOR(ES): SERGIO ANDRES NARANJO JEREZ

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON

RESUMEN

Como trabajo complementario dentro de los estudios realizados en la UPB, el arranque y operación de reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) a escala laboratorio simulando dos condiciones de flujo en la entrada (continua y discontinua) pretende solventar problemáticas acaecidas en el tratamiento secundario PTAR.

La metodología concebida involucro analizar el dinamismo que enfrenta un sistema de tratamiento muy cercano al tipo RAP. Desde, la condición del flujo que lo alimenta (caudal y pH), el comportamiento que expresan los microorganismos a través del tiempo tras reducir el sustrato y la operación bajo distintos regímenes de manera ascendente.

En base a registros cronológicos de monitoreo en PTAR, de producción de metano en el ensayo de actividad metanogenica especifica (AME) y parámetros de control durante la operación UASB (pH, alcalinidad parcial e intermedia, DQO, ST y STV principalmente además de DBO₅, N y P en menor medida) se reportara el éxito relativo en un medio bastante volátil, los cuales podrán retroalimentar toda la actividad en planta.

Palabras clave: Flujo PTAR, ensayo AME, UASB, tratamiento en continuidad y discontinuidad.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE: STARTUP OF LAB SCALE UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE
BLANKET REACTORS (UASB) SIMULATING TWO INLET
FLOW CONDITIONS**

AUTHOR(S): SERGIO ANDRES NARANJO JEREZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON

ABSTRACT

As a complementary work into studies developed for UPB, the startup and operation of lab scale Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactors (UASB) simulating two inlet behaviors (continuous & discontinuous) it's looking to fix problems presented in secondary treatment.

The methodology involve analyze the dinamism that face a treatment system close to RAP kind. Since, the flow condition who feed it (including pH), the microorganism behavior that expressed in time after bring down substrates levels and operation under different ascendent regimens.

According to chronological qualities of monitoring in WWTP, methane production test of specific methanogenic activity (SMA) and control parameters during UASB operation (pH, partial and intermediate alkalinity, COD, TS and TVS mainly and BOD₅, N P in a lesser extent) will report the relative success in a rather volatile, which may feedback all the activity on the system.

Keywords: Flow behavior WWTP, SMA test, UASB, continuous & discontinuous operation.

INTRODUCCION

La remoción de contaminantes presentes en el agua es un fin proyectado hoy en la mayoría de los entornos humanos donde los impactos son manejables si las descargas son debidamente conducidas. El cumplimiento de ese propósito fue impulsado principalmente buscando preservar la salud de las comunidades que pudieran servirse del líquido al desarrollar actividades productivas y por las normas que exigen una adecuada depuración de las sustancias contaminantes en las fuentes hídricas.

El agua como recurso ampliamente disponible en Colombia ha sido aprovechada y descargada en muchas ocasiones sin ningún tipo de tratamiento, alterando la fauna y flora que se encuentra en el entorno de este bien estratégico. Los estragos del desarrollo desmedido son evidentes en las ciudades más pobladas del país donde a pesar de los esfuerzos las aguas no solo de tipo domestico sino también industriales convergen muchas veces por una misma vía contaminando a su paso.

Existe entonces una amplia gama de posibilidades (físicas, químicas y/o biológicas) para tratar las aguas residuales, que ha venido desarrollándose con mayor fuerza desde mediados de la década de 1970 y que se han ajustado a diversos contextos geográficos como respuesta a las necesidades de una población local. Pero no basta con disponer de medios para construir y operar sistemas de tratamiento que al final generen serios perjuicios a una comunidad, es indispensable realizar estudios previos de tratabilidad (sistemas piloto) para acondicionar parámetros y saber responder a cambios en la calidad del agua.

En el ámbito local la Universidad Pontificia Bolivariana durante los últimos años ha sido una opción académica de interés en la región, que ha aumentado su número de estudiantes matriculados en distintos programas lo cual ha impulsado la ampliación de los espacios físicos. Sin embargo este incremento ha impactado directamente unidades que cumplen un servicio institucional, como es el caso particular de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR-UPB) que comenzó operaciones desde que el campus se ubicó en el km 7 vía a Piedecuesta y hasta hoy no ha tenido un acondicionamiento efectivo que esté acorde con los cambios.

Como alternativa para equilibrar las cargas que vienen fluctuando se quiere evaluar las condiciones operacionales del tratamiento secundario con el fin de implementar a escala piloto un sistema idóneo que procure mejores resultados. El montaje involucra hacer ensayos de Actividad Metanogenica Especifica (AME) y operar un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB), debido a que este último es un sistema que funciona con bajos requerimientos y permiten acomodarse a las condiciones del contexto.

JUSTIFICACION

El desarrollo del siguiente estudio contempla encontrar soluciones para una serie de factores que hacen de la operación PTAR UPB una situación limitada, debido a las condiciones que se imponen en cada hora. De manera que, examinados los caudales que transitan por el sistema se buscara regularizar los choques puntuales; los indicios de inhibición se identificarán para sugerir alternativas de corrección, y el proceder de las unidades de tratamiento entre continuidad y discontinuidad servirá para definir que ritmo operativo ofrece mejores garantías.

Los beneficios de estas actividades radican en la proyección que se piensa implantar, para lograr en medio de un voluble comportamiento índices que no alteren los resultados en reactor RAP o configuración disponible.

El sistema se retroalimentara entonces con todas las acciones cumplidas en la operación, pues al vincular hechos observados a escala laboratorio (AME y UASB) con el tratamiento en planta se podrá juzgar la incidencia diaria de los factores.

Como alternativas de fácil seguimiento y bajo costo energético, desarrollar pruebas anaerobias ligadas a un entorno real permite enriquecer el historial PTAR UPB pues con rigurosos fundamentos se informaría sobre las conductas obtenidas en distintos escenarios.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar las condiciones óptimas del afluente en el arranque de reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) a escala de laboratorio simulando dos condiciones de flujo en la entrada para la depuración de las aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar el diagnóstico de la discontinuidad de flujo y calidad del afluente en la carga orgánica recibida en la PTAR-UPB.
- Determinar la existencia de factores de inhibición por sustrato, asociadas a la relación C:N:P mediante ensayo de Actividad Metanogenica Específica – AME.
- Evaluar la influencia del flujo discontinuo y continuo en el arranque de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con manto de lodos – UASB, a escala de laboratorio.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 ANTECEDENTES

De acuerdo con los sistemas que buscan tratar eficazmente y bajo condiciones favorables las aguas residuales producidas en distintas actividades, la alternativa para climas cálidos que ha logrado mayor difusión es la del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con Manto de Lodos –UASB, aprovechando su capacidad para degradar elementos contaminantes con menores requerimientos¹.

La elevada digestión anaerobia que tiene lugar en el UASB fue estudiada y reconocida por el Dr. Gatzke Lettinga y sus colegas de la Universidad de Wageningen (Holanda) a finales de 1970, quienes pudieron reproducir el modelo en su país ofreciendo soluciones al sector agroindustrial.

En la UPB la actividad más reciente que demostró el interés por buscar operar sistemas de tratamiento anaerobio, caso puntual filtros, fue en el 2008². El estudio a escala piloto contempló evaluar las eficiencias operacionales durante la reducción de cargas orgánicas, al comparar guadua y grava como medios de soporte.

Indagando puntualmente entre las remociones de DQO, DBO y SST a diversos TRH los resultados fueron mejores en guadua, sin embargo su condición se vio afectada al no cumplir la relación AGV/Alcalinidad (recirculación de 24 horas). Razón que llevo después de contrastar cifras a definir que la grava como medio de soporte conservaba un mejor comportamiento, al lograr remociones del 60-82%.

Sin embargo ese esfuerzo académico hecho tesis no hizo transición a lo práctico, porque implicaba una inversión económica extra a la operación en PTAR, además de tener que garantizar tácitamente eficientes resultados paralelo con otras etapas.

Para la institución dado su crecimiento, el servicio prestado por el sistema secundario se ha quedado corto ante la creciente e irregular carga diaria contenida en el afluente, por lo que es urgente un ajuste u optimización de los espacios. Los hechos sugieren, que aparte de las normales medidas para ejercer control en el tratamiento se debe involucrar a la producción cotidiana de CH₄ (prueba AME) al

¹ von SPERLING, Marcos y CHERNICHARO, C. A. L. Biological wastewater treatment in warm climate regions. London (UK): IWA Publishing, 2005. p. 659.

² GOMEZ PLATA, Astrid H. y ALVAREZ SEQUEDA, Gabriel M. Evaluación de la eficiencia de un filtro anaerobio de grava a escala piloto, análisis comparativo con un filtro anaerobio de guadua – PTAR UPB. *Proyecto de Grado*. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, 2008. p. 65.

ser una herramienta de información veraz en medio de las fluctuaciones (Ince et al., 1995 citado por Gonzalez Macilla et al., 2005).

En el ámbito académico cercano la mención vuelve al 2008, con los filtros, pues antes de entrar en marcha fue “desarrollado” el examen de actividad del inoculo. Bajo el denominado método Botella de Mariotte se hizo su montaje, y al parecer no fue imagen segura de la propuesta AME entre otras cosas por no reportar multiplicidad en los resultados.

A nivel UNIVALLE (2005), se trabajó en la consecución de rangos óptimos que propiciaran neutralización en la digestión anaerobia. Aprovechando los recursos de la agroindustria se caracterizaron variedades biomásicas y se logró establecer los mejores desempeños para los microorganismos involucrados.

Por lo tanto proceder a hacer un ensayo de actividad metanogénica específica acompañado del arranque, asentamiento y total operación de un sistema de tratamiento a escala laboratorio es el complemento que esta investigación busca explorar para así mejorar la operación en el flujo pistón tipo RAP.

3.2 MARCO GEOGRAFICO

El campus de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga se localiza en el kilómetro 7 de la autopista vía a Piedecuesta, en una extensa área que contempla una planta física de 35.000 m² y con las quebradas Palmichala y Menzuli bordeando parte del terreno. Una de las instalaciones que presta servicios a la institución es la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales –PTAR, como requerimiento legal para reducir el impacto de cargas orgánicas en la Quebrada Menzuli ante la falta de un sistema de alcantarillado que conecte con la red. Su operación viene desde 1999, conserva aún su capacidad operativa y está distribuida en dos zonas:

Zona 1. En esta se desarrolla la separación a través de rejillas del material contenido en el agua residual (AR) y la conducción del efluente “clarificado” desde un foso de succión hacia una caja reguladora, posteriormente se le da paso a uno de los Reactores Anaerobios de Flujo a Pistón (RAP) habilitados para reducir la materia orgánica disuelta.

El sistema cuenta con bombas de succión y válvulas que se activan en periodos intermitentes y tras el paso del caudal por la unidad RAP este es almacenado transitoriamente en un pozo de succión, para ser sometido a una etapa superior de depuración.

Zona 2. Comprende un conjunto de canales, vertederos y caídas de nivel, útiles en la oxigenación del caudal procedente del reactor RAP. Este sistema complementario o tratamiento terciario permite remover elementos no aprovechados anteriormente, Nitrógeno y Fosforo principalmente, con una gran población de plantas conocidas como Buchón de agua, especie flotante que establece una relación entre su raíz y el dinamismo de los organismo presentes en el lodo a lo largo de los canales, para que el impacto en la descarga del agua tratada pueda superar las expectativas legales de remoción.

3.3 MARCO TEORICO

El agua es un recurso que al ser impactado por el desarrollo de actividades humanas recibe diversas descargas, constituidas generalmente por materia orgánica, sólidos y microorganismos procedentes de excretas, que son generalmente evacuados vía sistema de alcantarillado y/o cuerpos de agua natural más cercanos.

Sus orígenes son diversos, pueden ser domésticos, comerciales, institucionales y/o industriales, donde cada una posee características específicas y requiere estudios de acuerdo al caudal aportado para llegar a ser tratadas eficientemente.

Toda descarga de algún tipo de agua residual incide en menor o mayor escala en la calidad del cuerpo receptor, de acuerdo al uso que se le dé a este último, por tal razón el tratamiento y disposición de aguas contaminadas implican tener un reconocimiento absoluto de las condiciones físicas y químicas además de las biológicas. Los sólidos presentes, aquellos compuestos orgánicos biodegradables y las bacterias patógenas son referencias importantes pues las instalaciones dedicadas para la depuración de aguas tienen como fin su remoción.

3.3.1 Características generales en las aguas residuales

3.3.1.1 Físicas

Temperatura. Comparativamente es mayor en el agua residual que en el agua de suministro, debido al aporte hecho por labores domésticas o industriales. Su medición es fundamental, ya que puede afectar las reacciones y velocidades que tienen lugar durante el tratamiento además de reducir el oxígeno disuelto disponible para la vida acuática del lugar de descarga³.

³ ROMERO ROJAS, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2001. p.70.

Sólidos. Es el conjunto de materiales de mínimo tamaño que van desde material soluble hasta coloidal. Su clasificación se hace en base a⁴:

- El tamaño y estado
- Las características químicas
- La capacidad de sedimentación de las partículas

De acuerdo con la fracción a analizar se procede a hacer separación, calentamiento o sedimentación del agua residual. Su acumulación puede generar la pérdida del oxígeno disuelto de acuerdo con el cuerpo de agua al cual se les descargue.

Figura 1. Interrelación de las fracciones de sólidos presentes en las aguas residuales



Fuente: Tchobanoglaus y Crites, 2000.

3.3.1.2 Químicas

pH. Parámetro de la relación del ion hidrogeno en una solución, definido como el logaritmo negativo de la concentración de hidrogeno, que para aguas contaminadas necesita ser monitoreado para no limitar el proceso de depuración y la vida acuática tras su vertido. A continuación se describen los escenarios posibles⁵:

⁴ von SPERLING y CHERNICHARO, Op cit., p. 35.

⁵ ROMERO ROJAS, Op cit., p. 66.

- Aguas residuales en concentraciones adversas al ion hidrogeno son difíciles de tratar biológicamente (en la escala de pH las aguas menores a cinco y mayores a nueve).
- Aguas con pH menor a seis, en tratamiento biológico, favorecen el desarrollo de hongos sobre las bacterias.
- A pH bajo el poder desinfectante del cloro es más alto.
- A pH alto la presencia del nitrógeno amoniacal es gaseosa no iónica.

Podría considerarse entonces que el intervalo adecuado de pH para desarrollar las distintas etapas de un proceso de tratamiento está entre 6.5-8.5 unidades.

Alcalinidad. En el agua es un registro de su capacidad para controlar ácidos y cuando existen cambios imprevistos de pH. Puede surgir a partir de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos procedentes de diversos elementos (Ca, Mg, Na, K o amonio), situación que para las aguas residuales ayuda a establecer una condición alcalina (de 50-200 mg/L CaCO₃) además de ser útil en la regulación de los ácidos.

La capacidad expuesta por este parámetro es fundamental en el tratamiento químico de aguas residuales, en la remoción biológica de nutrientes, en la remoción de amoniaco y en los procesos anaeróbicos⁶.

Materia Orgánica. Característica de relevante importancia porque es una de las principales causas de la contaminación en el agua. Los microorganismos, cumpliendo sus ciclos vitales aprovechan el agente oxidante disuelto libre para estabilizarla.

En las aguas residuales las distintas sustancias inmersas (proteínas, carbohidratos, grasas y aceites entre otros) por cuestiones prácticas no pueden valorarse individualmente, pero en el caso particular del parámetro en mención se pueden adoptar formas directas o indirectas para su determinación que tienen una extendida aplicación.

Métodos Indirectos representativos:

- **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).** En cuerpos de agua el principal impacto por la contaminación es la reducción del oxígeno disuelto durante la estabilización del material orgánico, bajo condiciones aerobias. Es entonces un parámetro valido para el establecimiento de condiciones ideales, dirigido a microorganismos reductores del material orgánico disuelto en instalaciones de tratamiento y en la fijación de las cargas que se verterán a algún recurso hídrico.

⁶ Ibid., p. 29.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO).** Prueba que relaciona la materia orgánica que puede oxidarse químicamente con respecto al oxígeno, al someterse a una solución digestora (oxidante fuerte), una solución catalizadora (ácido sulfúrico y sulfato de plata) y elevada temperatura.

Es útil como medida de la concentración orgánica en aguas residuales. En su relación con la DBO₅ para descargas crudas va de 1.7-2.4, mientras que en flujos industriales este puede variar ampliamente. Por lo que dependiendo de tal índice, se puede concluir la biodegradabilidad y el tipo de tratamiento a emplear (Braile y Cavalcanti, 1979; citado por Von Sperling y Chernicharo, 2005).

Nitrógeno. Nutriente fundamental en el crecimiento de vida acuática, útil en la síntesis de proteínas y del cual es necesario conocer información sobre su disponibilidad para poder ajustarlo a las condiciones requeridas en el proceso de tratamiento biológico.

La forma predominante de Nitrógeno en un cuerpo de agua puede generar información de importancia acerca del estado de contaminación causado. Si la contaminación es reciente se habla de la forma orgánica o de amoníaco, o si es lo contrario la presencia es de nitrito.

Fosforo. Nutriente importante en el desarrollo de algas y otras formas de vida acuática, que para el caso del agua residual cruda se presenta como un polifosfato soluble o en forma de ortofosfato después de la hidrólisis. Las formas en que este último se presenta en solución acuosa dependen del pH y el elemento como tal dentro de los detergentes puede representar hasta 50% del total en agua residual⁷.

Cloruros. La concentración de cloruros en aguas residuales es una condición que se relaciona con el uso del recurso hídrico. Sus fuentes son el vertido de aguas domésticas, industriales y salinas en aguas superficiales.

En general, los procesos de tratamiento no logran remover cloruros de manera significativa pero un registro de concentración superior a la normal ayuda a concluir que una fuente hídrica está recibiendo descargas.

Para aguas residuales domésticas (ARD) crudas la concentración de cloruros está entre 30 y 200 mg/L, y a fracciones mayores de 15.000 mg/L son tóxicos para aplicar la depuración biológica⁸.

⁷ von SPERLING y CHERNICHARO, Op cit., p. 48.

⁸ CRITES, Ron y TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones.. McGraw-Hill (COL). p. 59_.

Sulfatos. En aguas residuales es un ion común, indispensable para la síntesis de proteínas y liberado cuando estas se degradan. Los sulfatos se reducen a sulfuros bajo condiciones anaerobias y pueden formar sulfuro de hidrogeno al combinarse con el hidrogeno.

Grasas y aceites. Fracción de materia orgánica soluble en hexano, que para las aguas residuales sus fuentes están en la cocción de alimentos principalmente. A estos se les nota flotando, recubriendo las superficies con las cuales entran en contacto, generando problemas de mantenimiento e interfiriendo incluso en las actividades biológicas al ser difíciles de degradar.

Grasas y aceites de origen vegetal y animal son usualmente biodegradables mientras que aquellas de carácter mineral no presentan igual comportamiento, motivo por el cual necesitan removerse antes de la etapa biológica.

3.3.1.3 Biológicas

Particularidades de notable importancia para el control de enfermedades causadas por diversos organismos y por su papel jugado en la estabilización de la materia orgánica, ya sea en un entorno natural o en instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

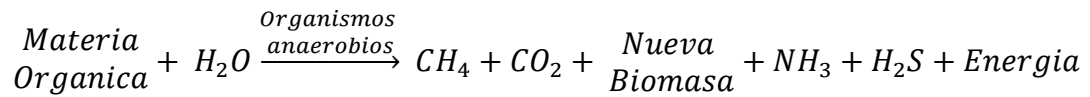
3.3.2 Sistema de tratamiento anaerobio

Como medida de saneamiento que aprovecha la capacidad de los microorganismos para reducir materia orgánica del agua residual, la descomposición biológica fermentativa en un entorno sin oxígeno molecular es una de las opciones ampliamente difundidas en los últimos años dentro del llamado tratamiento secundario de aguas residuales. Esta alternativa tiene la capacidad de soportar altas cargas orgánicas, lo que es útil para mitigar costos operacionales, no requiere una extensa área para cumplir su fin y minimiza los sólidos producidos.

El rendimiento típico de esta alternativa ronda entre el 65 y 80% para DBO y DQO mientras que en SS es del 60-70%⁹. Sin embargo los resultados con relación al fosforo, nitrógeno y organismos patógenos van del 30-40% para el primero y son nulos para el resto, razón que lleva en la mayoría de los casos a implementar una etapa adicional de reducción.

⁹ REPUBLICA DE COLOMBIA, DIRECCION DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO, 2000. RAS, Titulo E. p.49.

Reacción 1. Descomposición general de la materia orgánica por vía anaerobia



La actividad metabólica bacteriana desarrollada involucra diversos grupos, quienes aprovechan al máximo el material orgánico disuelto y el reducido en las serie de fases anaerobias, buscando suplir sin ningún inconveniente necesidades energéticas y reproductivas. El balance de materia alcanzado señala la eficiente interacción entre organismos, la no acumulación de compuestos inhibidores y el adecuado control de las condiciones en el medio, a pesar de las distintas velocidades de reacción de acuerdo con la composición del sustrato.

3.3.2.1 Transición del sustrato¹⁰

Hidrólisis. Etapa que inicia la transición del material complejo de difícil asimilación (proteínas, carbohidratos y lípidos) hacia uno de menor peso molecular. Tras la acción de exoenzimas excretadas por bacterias fermentativas hidrolíticas, sustancias de simple disolución pueden ingresar a través de las células membranosas de los grupos presentes. El proceso ocurre lentamente, y factores como la temperatura, el TRH, el pH del medio, concentración de elementos producto de la hidrólisis, pueden afectar el grado y proporción a la cual el sustrato es transformado (factores de inhibición).

Entre las bacterias (facultativas) implicadas en la conversión del material están: *Clostridium*, *Proteus*, *Bacteroides*, *Bacillus*, *Vibrio*, *Acetovibrio* y *Staphylococcus*¹¹. Los compuestos excretados por las células incluyen ácidos grasos volátiles, alcoholes, ácido láctico, CO₂, H₂, amoníaco y sulfuro de hidrogeno, además de nuevas células bacterianas.

Acidogenesis. Los productos solubles resultantes de la primera etapa son aprovechados aquí por organismos fermentativos generadores de ácidos y de tipo facultativo. Partiendo de sustancias orgánicas simples como Ácidos Grasos Volátiles (AGV), aminoácidos, azúcares y lípidos la conversión los presenta ahora como ácidos orgánicos (propiónico, fórmico, láctico, butírico o succínico), alcoholes y cetonas (etanol, metanol, glicerol, acetona), acetato y compuestos minerales (CO₂ y H₂).

¹⁰ PARDO, José. Análisis de la viabilidad del uso de lodos anaerobios en la alimentación animal. Tesis (Master en Biotecnología). Cuba: Universidad de Oriente, 1998. p. 7-15. [online]
<http://www.scribd.com/doc/58449837/Perez-Pardo-Jose-Lucas-Viabilidad-del-digestato-en-reactores-de-vinazas-para-la-alimentacion-anima>

¹¹ RODRIGUEZ, Jenny. Tratamiento anaerobio de aguas residuales. 2004. [online]
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>

El conjunto responsable incluye a bacterias: Clostridium, Lactobacillus, Escherichia, Bacillus, Pseudomonas, Desulfovibrio y Sarcina¹².

Acetogenesis. Conforme al orden del ciclo en la digestión anaerobia microorganismos representativos tipo Syntrophobacter wolinii y Syntrophomonas wolfei¹³ consumen en esta etapa destacados sustratos como ácidos acético, propionico y butírico. Ese material al oxidarse pasa a ser acetato, H₂, CO₂ y nueva biomasa. Alrededor del 70% de la DQO inicial es convertida en ácido acético y el resto en H₂ (Haandel y Lettinga, 1994; citado por Jurado y Ortiz, 2006).

Metanogenesis. Etapa final en el proceso de degradación que es cumplida por arqueas metanogenicas. Los sustratos son limitados, y comprenden ácido acético, H₂/CO₂, ácido fórmico, metanol, metilaminas y CO₂. Dada su afinidad por el sustrato y amplia producción de metano, estos grupos de organismos se dividen en¹⁴:

- Metanogenicos aceticlasticos, minoritario grupo de organismos que recurren al acetato, responsables del 60 al 70% de la producción de metano. Son los que prevalecen en la digestión anaerobia.
- Hidrogenotropicos metanogenicos, grupo de bacterias metanogenicas reconocidas capaces de producir CH₄ a partir de H₂ y CO₂ carbono. Por lo general son mayoría en esta etapa.

Tabla 1. Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de materia orgánica

TIPO DE REACCION	REACCION
Fermentación de glucosa a acetato	Glucosa + 4H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + 4H ⁺ + 4H ₂
Fermentación de glucosa a butirato	Glucosa + 2H ₂ O → C ₆ H ₇ O ₂ ⁻ + 2HCO ₃ ⁻ + 3H ⁺ + 2H ₂
Fermentación de butirato a acetato e H ₂	Butirato + 2H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + H ₂
Fermentación del propionato a acetato	Propionato + 3H ₂ → CH ₃ COO ⁻ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + H ₂
Acetogenesis a partir de H ₂ y CO ₂	HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + 4H ₂ → CH ₃ COO ⁻ + 2H ₂ O
Metanogénesis a partir del CO ₂ y H ₂	HCO ₃ ⁻ + 4H ₂ → CH ₄ + 3H ₂ O
Metanogénesis a partir del acetato	Acetato + H ₂ O → CH ₄ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺

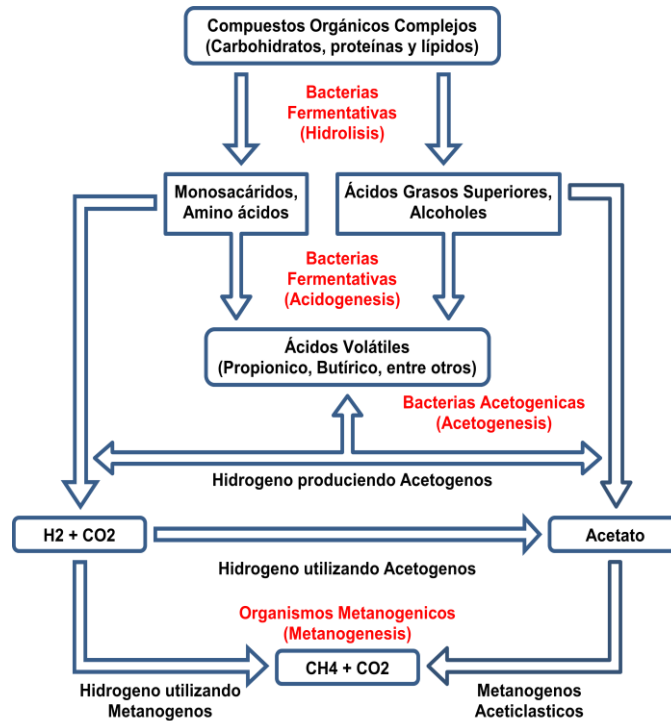
Fuente: Zinder y Koch, 1984; citado por Rodriguez V., 2004.

¹² Ibid., p. 6.

¹³ Ibid., p. 6.

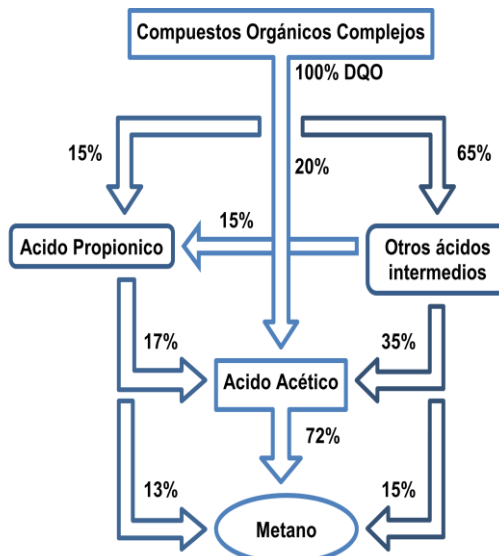
¹⁴ von SPERLING y CHERNICHARO, Op cit., p. 666.

Figura 2. Esquema general de las vías metabólicas generadas por los grupos involucrados en la digestión anaerobia.



Fuente: Adaptado de Lettinga et al., 1996; por von Sperling y Chernicharo, 2005.

Figura 3. Rutas para la formación de CH₄ por fermentación de compuestos complejos.



Fuente: Adaptado de McCarty, 1964; por von Sperling y Chernicharo, 2005.

Tabla 2. Composición típica del biogás¹⁵

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
Metano	50-75
Dióxido de carbono	25-50
Hidrogeno	5-10
Nitrógeno	1-2
Ácido sulfhídrico	Trazas
Otros	Trazas

Fuente: Yadava y Hesse, 1981; FAO, 1996; Pipoli, 2005; GTZ, 2009.

Sulfato reducción. En el tratamiento de agua residual que contienen sulfatos o sulfitos estos pueden aprovecharse por bacterias reductoras de sulfato. Aquí, el metabolismo de los microorganismos es importante en el tratamiento anaerobio, principalmente por su producto final, sulfito de hidrogeno.

Este es un grupo de organismos agitados, capaz de usar un rango amplio de substrato que incluye toda la cadena de ácidos grasos volátiles, varios ácidos aromáticos, hidrogeno, metanol, etanol, glicerol, azucares, aminoácidos y demás compuestos fenólicos.

Son reconocidos para este caso dos grupos representativos:

- Los capaces de oxidar de manera incompleta sus substratos a acetato.
- Los capaces de oxidar sus substratos orgánicos, incluyendo acetato a CO₂.

Esta alternativa al ponerla en marcha impulsa la competencia con fases anteriores, provocando así el descenso en la producción de metano si se parte de una cantidad dada de material orgánico presente en el afluente. La importancia del enfrentamiento es más grande cuando la concentración relativa de SO₄⁻² aumenta al compararse con la concentración de DQO¹⁶.

3.3.2.2 Factores que afectan la Digestión Anaerobia en Aguas Residuales

Tipo de Sustrato. Establece la cadena de consumidores que tienen lugar en un sistema de tratamiento, donde la cantidad de organismos es proporcional a su disponibilidad. La superioridad de alguna vía metabólica será definida al conjugar la velocidad de producción y la idoneidad para aprovechar el sustrato.

¹⁵Anaerobic digestion (general). [online]

<http://www.sswm.info/category/implementation-tools>

[/wastewater-treatment/hardware/processes/anaerobic-digestion-general](http://www.sswm.info/category/implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/processes/anaerobic-digestion-general)

¹⁶ von SPERLING y CHERNICHARO, Op cit., p.667

Es primordial definir si el material puede reducirse biológicamente. Su estimación se hace al comparar las diferencias entre los contenidos de DQO y DBO₅. Si el resultado es grande, corresponde a una alta proporción de compuestos no biodegradables (Díaz et al., 2002; citado por González y Otero, 2005).

Cuando en la DQO biodegradable se agrupan compuestos como azúcares y aminoácidos, las limitaciones están en la metanogénesis, a raíz de la rápida capacidad fermentativa que poseen las bacterias para acidificar el sustrato, un ritmo 8 veces mayor que el alcanzado por formadoras de metano al aprovechar los AGV de su etapa. Tras dichos sucesos, la máxima carga de DQO reducible biológicamente que puede aplicarse es definida por el potencial de aprovechamiento de la DQO total biodegradable, correspondiente a la comunidad metanogénica.

Temperatura. Factor fundamental para el desarrollo de los microorganismos pues rige sensiblemente la condición de las células en el entorno. Su influencia puede ir desde la alteración del equilibrio iónico, el ritmo de las actividades metabólicas y cantidad de biogás generado, y en la disolución de los sustratos. Por lo general en el proceso biológico se cumplen tres rangos de crecimiento bacteriano (Blatstone et al., 2002).

- Rango psicrófilico: entre 4 y 15°C aproximadamente
- Rango mesófilico: entre 20 y 40°C aproximadamente
- Rango termófilico: entre 45 y 70°C, y superior

Asimismo en cada uno de ellos existen tres condiciones las cuales ayudan en la caracterización de las especies¹⁷:

- Temperatura mínima: por debajo de la cual no hay posibilidades de desarrollo y solo en su aumento paulatino se alcanza mejores resultados.
- Temperatura óptima, impulsa el crecimiento máximo sin embargo superar esta condición por mínima diferencia causa una abrupta caída en la tasa de desarrollo, cercana a cero.
- Temperatura máxima, punto límite por encima del cual no hay posibilidades.

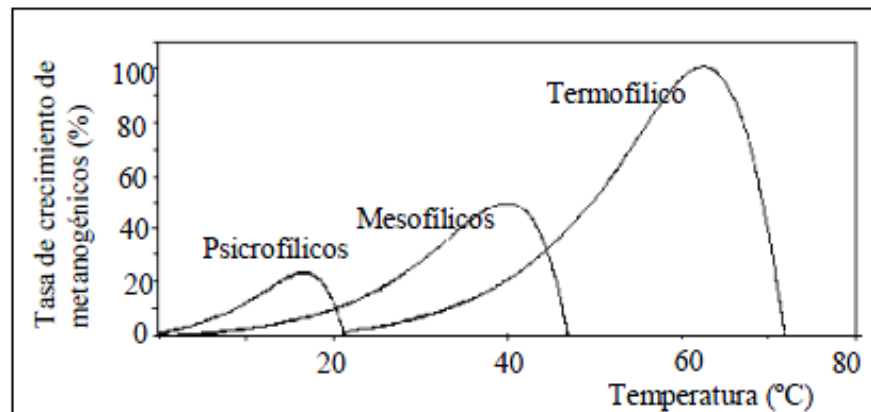
¹⁷ von SPERLING y CHERNICHARO, Op. cit., p. 685.

Los microorganismos ostentan un punto óptimo dentro de sus ciclos biológicos, que tiende a ser elevado en un rango definido, especialmente a altos niveles, los cuales dependen de la termoestabilidad en la síntesis de proteínas ejercida por cada ente bacteriano (Cano, 2004; citado por Jurado y Ortiz, 2006).

No obstante en la dinámica del proceso se enfrenta, por ejemplo, un amplio margen (0 a 97°C) que asocia los niveles mesofílico (30 a 35°C) y termofílico (50 a 55°C) en la generación microbiana de metano, lo que permite puntualizar ciertos límites alcanzados por las células¹⁸. Y es que para organismos metanogénicos los cambios de temperatura promueven impactos más notorios debido a su baja tasa de crecimiento con respecto a otros, como los acetógenos, quienes pueden lograr un catabolismo apreciable aun a bajas temperaturas (Schmid and Lipper, 1969)¹⁹.

Hoy la mayoría de los sistemas digestores son mesofílicos porque a bajas temperaturas la tasa de degradación es mínima, hecho que hace necesario prolongar los periodo hidráulicos (TRH) y de retención de sólidos (TRS) (Lettinga et al. 2001) a consecuencia de la lenta hidrólisis de los sólidos volátiles, mientras que en una condición alta se propicia la degradación de enzimas o la caída del metabolismo pues no se cuenta con mecanismos de control (Cano, 2004; citado por Jurado y Ortiz, 2006).

Figura 4. Influencia de la temperatura en la tasa de crecimiento de la biomasa.



Fuente: Adaptado de van Lier et al., 1997; por von Sperling y Chernicharo, 2005.

¹⁸ von SPERLING y CHERNICHARO, Op. cit., p. 685-686.

¹⁹ The effects of environmental factors on anaerobic digestion. [online] <http://www.fao.org/docrep/T0541E/T0541E06.htm>

Nutrientes. Las exigencias nutricionales de los organismos involucrados en el proceso aunque son bajas obedecen a la concentración de DQO biodegradable en el agua residual (Díaz et al., 2002; citado por González y Otero, 2005). Se suplen principalmente con carbono orgánico y ciertos elementos inorgánicos, micro y macronutrientes como el nitrógeno (NH_3 o N orgánico), fósforo (ortofosfato inorgánico) y azufre (sulfitos), y en bloque a partir de reacciones bioquímicas de oxidación del sustrato se obtiene energía para la síntesis (Jurado y Ortiz, 2005).

Por lo general si hay deficiencias en la carga de nutrientes debe existir una compensación, que a veces surge en el tratamiento combinado de varios tipos de aguas residual. Considerando las relaciones promedio expuestas por Lettinga (1983) entre la DQO:N:P, para aguas residuales totalmente acidificadas esta debe ser 1000:5:1 (degradación de AGV) mientras que en aguas residuales no acidificadas se ubicaría en 350:5:1 (degradación de carbohidratos)²⁰.

pH, Alcalinidad y Ácidos grasos Volátiles. Parámetros valorados estrechamente, que en conjunto son tenidos en cuenta para verificar el oportuno desarrollo del proceso anaerobio. Podría decirse que el pH establece los límites de desempeño para los microorganismos, pues cada grupo posee unas condiciones ideales para realizar la conversión del material.

Por ejemplo, para las bacterias productoras de metano que son altamente vulnerables a los cambios de este factor el entorno debe ir de 6.3 a 7.8 (van Haandel y Lettinga, 1994; citado por Seghezzi, 2004) mientras que en el caso de los grupos hidrolíticos debe rodear las 6.0 unidades (Sleat & Mah, 1987; citado por Luostarinen, 2005).

En el contexto sin oxígeno, por lo general las bacterias formadoras de ácidos crecen mucho más rápido que las generadoras de metano, pH entre 5.0 y 6.0, y dado el caso que las primeras alcancen un crecimiento significativo los ácidos grasos que producen saturarán el sistema hasta desbordar la posibilidad de consumo de las segundas²¹. Consecuencia directa la caída del pH, es decir el desequilibrio del entorno (toxicidad por amoníaco y AGV, la disponibilidad de nutrientes y CO_2) e inhibición de la actividad del grupo consumidor por completo (Zegers, 1987; Díaz et al, 2002; citado por Jurado y Ortiz, 2005).

²⁰ von SPERLING y CHERNICHARO, Op cit ., p. 683.

²¹ BURKE, Dennis. Dairy of Waste Anaerobic, Digestion Handbook. [online]
<<http://www.mrec.org/pubs/Dairy%20Waste%20Handbook.pdf>>

Tabla 3. Rangos óptimos de pH para la degradación de ciertos sustratos

SUBSTRATO	pH OPTIMO
Formiato	6.8-7.3
Acetato	6.5-7.1
Propionato	7.2-7.5

Fuente: Lettinga et al., 1996; von Sperling y Chernicharo, 2005.

En ocasiones no existe la necesidad de adiciones químicas para alcanzar un punto ideal de pH, todo porque hay suficiente capacidad buffer en el medio, es decir alcalinidad. Si la alcalinidad es lo suficientemente alta, concentraciones elevadas de AGV pueden tolerarse sin llegar a acidificar la vía anaerobia. Pero si la situación es contraria, es necesario incluir bicarbonatos (NaHCO_3) o compuestos que reaccionen con el CO_2 y los generen (NaOH o Ca(OH)_2)²².

La interacción presente entonces a través de la alcalinidad y los AGV es en función de si hay capacidad para neutralizar los ácidos formados y/o de amortiguar el pH en caso de llegar a acumularse.

Y es que en el monitoreo de reactores anaerobios, la revisión regular de la alcalinidad tiene mayor importancia que evaluar el pH, porque mínimas reducciones en este último señalan un gran consumo de la alcalinidad. Para definir de manera autónoma las fracciones derivadas de componentes orgánicos en la digestión, alcalinidad bicarbonacea y por ácidos volátiles, la valoración de una muestra puede hacerse en dos fases, de acuerdo con la metodología propuesta (Ripley et al., 1986):

- Valoración hasta pH 5.75, detalla la Alcalinidad Parcial (AP) prácticamente equivalente a la alcalinidad bicarbonacea.
- Valoración hasta pH 4.3, es la Alcalinidad Intermedia (AI) prácticamente equivalente a la alcalinidad de los ácidos volátiles.

Como aspectos fundamentales en la digestión anaerobia la relación AI/AP debe ser menor a 0.3 mientras que para AGV/Alcalinidad no debe superar 0.35, de lo contrario pueden representarse perturbaciones y/o señales de inestabilidad en el proceso (Ripley et al., 1986).

²² LUOSTARINEN, Sari. *Anaerobic on-site wastewater treatment at low temperatures. Academic Dissertation.* University of Jyväskylä (FIN). Faculty of Mathematics & Science. Jyväskylä, 2006. p.17. <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13169/951392274X.pdf?sequence=1>

Material toxico. Fijar la condición toxica de cierto material presente en las aguas residuales es una situación que debe someterse a revisión, de acuerdo a factores como la concentración y la capacidad de adaptación de las bacterias al medio. La razón se debe a que el nivel que es estimulante a bajos valores y no fomenta cambios en cantidades intermedias puede ser inhibidor en medidas altas durante la digestión (Ritmann y McCarthy, 2001; citado por González y Otero, 2005).

La perturbación es probable que sea consecuencia de la acumulación de subproductos metabólicos, como H₂, H₂S, NH₃ y AGV, por sustancias disueltas comunes dentro de la alimentación o tras el ingreso accidental de metales pesados. El impacto se acentúa en los organismos formadores de metano, dado el reducido sustrato convertido en células y el largo término que necesitan para su desarrollo, haciendo de este proceso entonces una etapa de riguroso seguimiento.

Los siguientes métodos se sugieren para el control de la condición nociva (McCarty, 1964; citado por von Sperling y Chernicharo, 2005):

- La remoción de los elementos perjudiciales.
- Dilución por debajo del límite desfavorable.
- Formación de complejos insolubles o precipitación.
- Uso de material opuesto

Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y Carga Orgánica. Factores que definen el volumen y diseño del sistema de tratamiento a emplear para un sustrato en particular, donde el TRH debe coincidir con el tiempo de retención celular (biomasa) para garantizar la expansión de la población. Su manipulación y control es simple, esto con el fin de lograr la separación y enriquecimiento de los grupos involucrados²³.

El estrecho vínculo lleva a que la carga orgánica, cantidad de materia aplicada diariamente por unidad de volumen, sea dependiente de la concentración y el TRH, e incluya a la DQO y/o los sólidos volátiles como formas de expresión. Cuando las cargas son altas y no hay presencia de inhibidores, semejantes van a ser las producciones volumétricas de biogás. Asimismo, parece que al aumentar el flujo másico orgánico puede contrarrestarse el efecto inhibidor pero el resultado es adverso, surgen sobrecargas puntuales, y de allí la acumulación de AGV que encausan el sistema hacia la acidificación (Ortega, 2006; citado por Zamorano, 2009).

²³ LU, Jingquan. *Optimization of anaerobic digestion of sewage sludge using thermophilic anaerobic pre-treatment. Thesis PhD.* Technical University of Denmark (DEN). BioScience and Technology, BioCentrum. Lyngby, 2006. p. 24. <http://www.forskningsdatabase.dk/Search.external?operation=search&search-query=au:%22Lu+Jingquan%22>.

Lo anterior permite deducir, por ejemplo, la necesidad de retener una biomasa lo suficientemente grande para sistemas de alta tasa (reactores de segunda generación), como lo es el propósito de cualquier tratamiento biológico y del presente estudio. Allí, los tiempos de retención de sólidos (TRS) aumentan en comparación al TRH, en esencia buscando mantener la carga bacteriana del lodo en el sistema o para separarla del efluente y retornarla. La recompensa está en que tienden a ser económicos, a pesar de las importantes cargas volumétricas que deben soportarse aun si llegasen a trabajar en periodos cortos.

Las siguientes condiciones son necesarias para reactores anaerobios de alta tasa (Lettinga, 1993; citado por de Mes et al., 2003)²⁴:

- Una alta concentración de lodo bacteriano anaerobio debe ser retenido bajo condiciones altas de carga orgánica (>10kg/m³.dia) e hidráulicas altas (> 10m³/ m³.dia).
- El máximo contacto debe ocurrir entre el material afluente y la masa bacteriana.
- Deben experimentarse mínimos problemas de transporte con respecto a los componentes del sustrato, intermitentes y productos finales.

Los sistemas de alta tasa se dividen en²⁵:

- De película de bacteria fija en superficies solidas
- De masa bacteriana suspendida, donde la retención es alcanzada por el asentamiento externo o interno (UASB y filtro anaerobio)

Operativamente inciden parámetros mencionados previamente como la temperatura y el sustrato, aparte de la distribución del flujo de entrada, la recolección del efluente, la fracción solida orgánica en el desecho y su degradabilidad. Entre más compleja sea la degradación del material disuelto en el afluente, el arranque del tratamiento tendrá un mayor TRH (Gutiérrez, M, 2001; citado por Jurado y Ortiz, 2005), no obstante si se asegura un tiempo optimo es viable obtener un lodo con mejor sedimentabilidad y actividad metanogenica.

²⁴ De MES, Titia; STAMS, A.; REITH, J. & ZEEMAN, Grietje. (2003): Chapter 4. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. p.62. In: REITH, J.H. (Editor); WIJFFELS, R.H. (Editor); BARTEN, H. (Editor) (2003): Biomethane and Biohydrogen. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production. p. 59-93.

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/

REITH%20et%20al%202003%20Bio-methane%20and%20Bio-hydrogen%20-

Status%20and%20Perspectives%20of%20Biological%20Methane%20and%20Hydrogen%20Production.pdf

²⁵ Ibid., p. 63.

Tabla 4. TRH recomendados para reactores UASB tratando ARD

Temperatura del agua residual (°C)	TRH (Horas)	
	Promedio diario	Mínimo (de 4 a 6 horas)
16-19	> 10-14	> 7-9
20-26	> 6-9	> 4-6
> 26	> 6	> 4

Fuente: Lettinga y Hulsoff Pol, 1991; von Sperling y Chernicharo, 2005.

3.3.2.3 Biomasa

Al hacer referencia de la variedad que presentan los microorganismos en cuanto al tamaño, forma, fases de desarrollo y estructura, estas son condiciones significativas en la digestión anaerobia pues inciden en el éxito de todo el proceso. Por ejemplo, para la organización de estructuras de agregados celulares los requisitos van desde el rango del tamaño celular, dentro de una población microbiana, y la ubicación de cada individuo con respecto a otros en un medio de crecimiento.

En entornos con alta tasa, la asociación entre organismos para superar condiciones inestables es alcanzada al acoger diversas figuras. La fijación a una superficie está entre ellas, ya sea, un manto suspendido, en movimiento o un medio estacionario de soporte. Al parecer las estructuras bacterianas controlan de alguna manera el poder para adherirse mientras sus reducidas dimensiones garantizan la firmeza ante fuerzas de corte ocurridas naturalmente en el medio.

Otra de las configuraciones es el desarrollo bacteriano entorno a un floculo, floculación. Esta es separable fácilmente por sedimentación y garantiza esencialmente bajas concentraciones de solidos suspendidos en el efluente, no obstante su crecimiento se omite en la remoción eficiente de substratos.

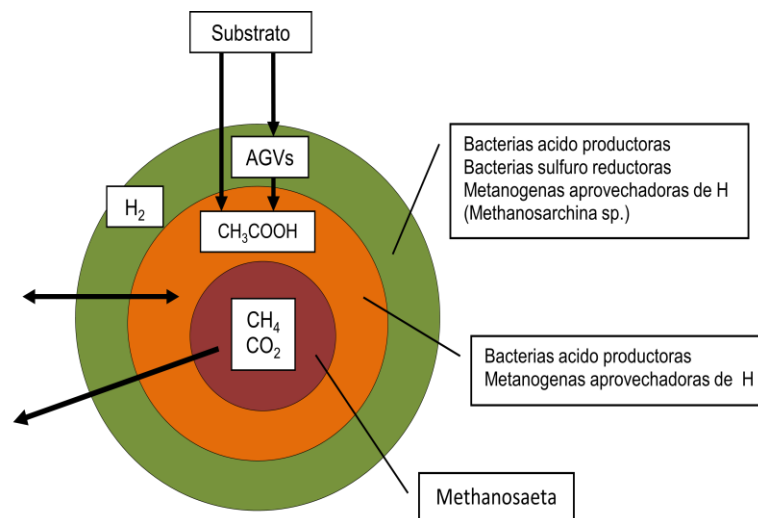
La circunstancia para unidades UASB y, en menor medida, filtros anaerobios es la formación de gránulos, asociado a la actividad desplegada en aguas residuales ricas en carbohidratos y ácidos volátiles. Su estabilidad es conseguida de acuerdo a condiciones físicas, químicas y biológicas, incluyendo (Lettinga et al., 1980; Hulshoff Pol et al., 1984; Wiegant & Lettinga, 1985; citado por von Sperling y Chernicharo, 2005):

- Las características del sustrato.
- La compresión gravitacional de las partículas de lodo y la tasa superficial de liberación de biogás.
- El acondicionamiento selectivo logrado por las bacterias a través de capas.
- Las condiciones ideales para el crecimiento de las arqueas metanogénicas, así como la presencia de cationes bivalentes.
- La velocidad de ascenso del líquido a través del manto de lodos, básica para mantener una presión constante sobre los microorganismos que inician su común adhesión.

Los gránulos usualmente tienen una forma bien definida que puede ser de varios milímetros en diámetro, acumulable en grandes cantidades dentro de la unidad. Las ventajas de acuerdo al punto de vista ingenieril están en (Fitzpatrick, 1989; citado por Hulshoff Pol, 1989):

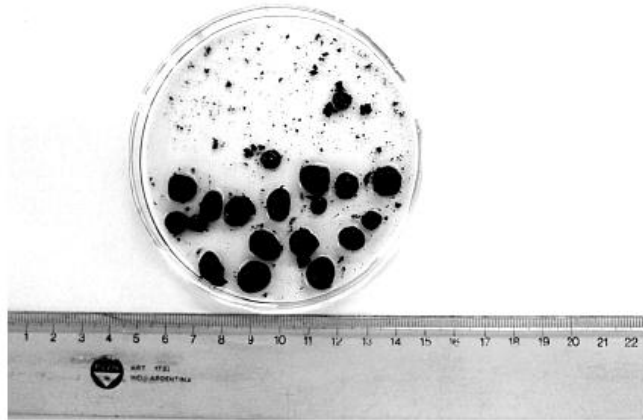
- Su densa agrupación y estabilidad lleva a heterogéneas poblaciones a someterse bajo favorables condiciones fisiológicas.
- El aprovechamiento del volumen total en la unidad de tratamiento.
- La máxima relación bacterias/volumen debido a la forma esférica.
- En condiciones donde la composición de la gran masa en solución es desfavorable para el crecimiento (ej. pH extremo), un micro entorno más favorable puede surgir dentro del agregado tras posibilitar el metabolismo.

Figura 5. Modelo de organización para los organismos que conforman un gránulo.



Fuente: Guiot et al., 1992.

Figura 6. Gránulos observados en un reactor UASB



Fuente: GUERRA et al., 2000.

3.3.2.4 Optimización de la actividad microbiana

Para garantizar el éxito de los procesos anaerobios de elevada actividad, aparte de examinarse parámetros recurrentes de control, es necesario mantener una biomasa capaz de soportar el choque de las cargas presentes en el agua residual. Hoy, el desarrollo de técnicas que evalúan el desempeño de los organismos en unidades de tratamiento es fundamental, en particular de los formadores de metano pues así se puede refrescar la acción del ciclo.

La actividad metanogénica específica (AME) como parámetro confiable dentro del conjunto de posibilidades, ayuda a precisar la máxima velocidad de producción de metano durante la digestión. Se expresa como la DQO bajo condiciones ideales respecto a los SSV contenidos ($\text{gDQO-CH}_4/\text{gSSV-día}$), y junto a la calidad del lodo existente señalan la carga tolerable al inicio e incluso el comportamiento de la biomasa durante el periodo de arranque (Molina, 1997; citado por Jurado y Ortiz, 2006).

Razón por la cual el desarrollo de ensayos AME es útil para valorar el poder de adaptación que tienen los microorganismos para reducir substratos. La medición es indirecta debido a que el biogás emitido se registra vía desplazamiento de un volumen, con lo que la técnica resulta ser la manera ideal para (von Sperling y Chernicharo, 2005):

- Clasificar el potencial de la biomasa al convertir substrato soluble en CH_4 y CO_2 .
- Evaluar el comportamiento de la biomasa bajo el efecto potencial de sustancias inhibidoras.
- Determinar la toxicidad que ejercen algunos químicos presentes en efluentes líquidos y residuos sólidos.

- Establecer el grado de descomposición de diversos substratos, en especial del agua residual industrial.
- Determinar la máxima carga orgánica que puede aplicarse a cierto tipo de lodo, y el ritmo en el arranque del sistema de tratamiento.
- Precisar parámetros cinéticos.

Para lodos granulares índices típicos de 0.5-2.0 gDQO-CH₄/gSSV*día resultan ser de alta actividad, entretanto biomazas de ARD digeridas que sobresalen al ser principalmente floculentas se ubican entre 0.020-0.200 gDQO CH₄/gSSV*día (Alazar y Molina, 1997; Arroyo, 2000; citado por Jurado y Ortiz, 2006).

De manera general según Hulshoff Pol (1989), bajo condiciones mesofílicas se encuentra que a 30°C el proceso metanogénico genera 1.0 kgDQO-CH₄/gSSV*día para sustrato no acidificado (degradación de azúcares) y 2.5 kgDQO-CH₄/gSSV*día en el sustrato acidificado (degradación AGVs). Reportados en literatura hay valores mayores, donde con incertidumbre por ejemplo entre 27-29°C se limitan las acciones por elementos traza al ir de 1.3-2.6 kgDQO-CH₄/gSSV*día los términos (Guiot et al., 1988; citado por Hulshoff Pol, 1989)

Un hecho relevante a tener en cuenta en el tratamiento es el volumen de inóculo, y su incidencia sobre el arranque tras lograr asociarse. Si el volumen resultante es escaso el proceso se hace más lento, ahora, si es lo contrario hay un lavado de lodos en la unidad depuradora.

Así que, la recomendación es calcular el monto de semilla a aplicar en términos de su concentración en el reactor (kg SSV/m³) en vez de referirla como fracción de volumen, por la elevada variabilidad relacionada a la concentración del lodo. El intervalo sugerido sería de 10-20 kg SSV/m³ con una máxima ocupación del 60% en reactor para evitar problemas en la marcha (Hulshof et al., 1996), como el arrastre de bacterias durante el arranque y la carga orgánica volumétrica, TRH y concentración interna de AGV.

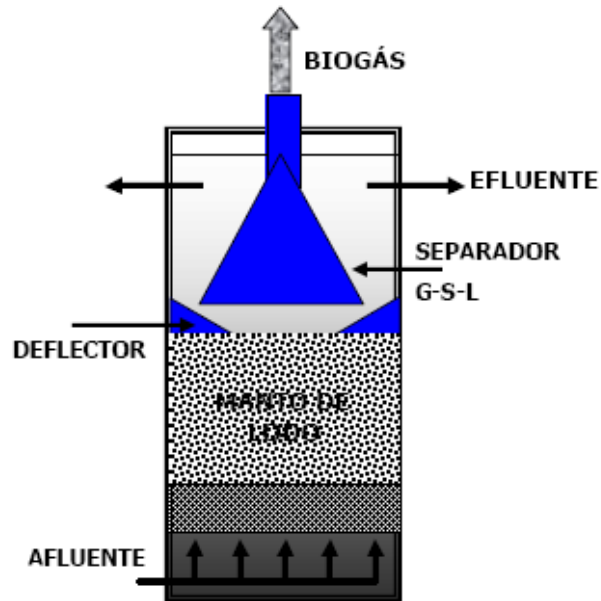
3.3.2.5 Reactor UASB

Unidad de flujo ascendente con manto de lodos, de amplia difusión en países tropicales y subtropicales, desarrollada por Gatzke Lettinga y sus colegas en Holanda para el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica.

Su operación comprende la inferior entrada del flujo de AR, donde un lodo constituido por floculos y/o gránulos dada su densidad es espesado y expone concentraciones entre el 40-100 g ST/L (von Sperling y Chernicharo, 2005). El tránsito del sustrato prosigue después por perfiles progresivamente más

dispersos, colmados de biomasa ligera (concentraciones del 3-1% ST)²⁶, permitiendo así que en toda la unidad exista contacto con el manto.

Figura 7. Esquema general de un reactor UASB



Fuente: Rodriguez V., 2004.

Fruto de las condiciones anaerobias la transformación del material a biogás tiene lugar en todas las zonas, el cual es útil en la mezcla de los contenidos del reactor, y que en su búsqueda por alcanzar la superficie ayuda a formar y mantener compactos los cúmulos de microorganismos. El diseño del reactor permite en la parte superior aislar el biogás de los sólidos y acumularlo, motivando así el regreso de la mayoría de las partículas presentes en el lodo para mantener altas concentraciones en el interior.

La estructura puede catalogarse entonces como un separador líquido-sólido-gas, con un tiempo de retención hidráulico bajo (de 6 a 10 horas, ver Tabla 4) y de reducido volumen en comparación con otros sistemas de tratamiento.

La producción de lodo es muy baja y el residuo generado por el reactor se encuentra ya digerido y espesado, lo que facilita su deshidratación en lechos de secado o en algún procedimiento similar. Un aspecto a tener en cuenta es la remoción de la DBO que está alrededor del 80% (Kato et al., 2001; citado por

²⁶ von SPERLING y CHERNICHARO, Op cit ., p. 742.

Mrisho, 2007)²⁷ de acuerdo a experiencias en PTAR del Brasil, menor que en cualquier otro sistema, lo que conlleva a establecer una etapa posterior de tratamiento para alcanzar mejores eficiencias.

Criterios de diseño. La capacidad de un reactor para contener y fomentar la debida actividad del lodo retenido son aspectos logrados al seguir reiteradas líneas de trabajo. A continuación se enuncian las características efectivas de operación para llevar a buenos términos el proceso.

Tabla 5. Principales criterios de diseño para reactores UASB a escala real

PARAMETRO	RECOMENDACIONES
Carga hidráulica volumétrica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estudios experimentales demuestran que no debe exceder los 5.0 m³/m³dia (TRH de 4.8 horas). ✓ El diseño con más altos valores de carga hidráulica o más bajos TRH, puede generar pérdidas al sistema como el lavado del lodo, efecto del aumento de las velocidades de elevación en la digestión, reducción en la edad del lodo (TRS) y la tasa de crecimiento con respecto al periodo de residencia de la biomasa.
TRH	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se relaciona con la velocidad de digestión anaerobia y depende del tamaño del reactor (mirar Tabla QAZ).
Tasa de carga orgánica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ En plantas a gran escala debe ser menor a 15 kg DQO/m³dia. ✓ En aguas domesticas con concentraciones menores a 1000 mgDQO/L, la tasa orgánica es de 2.5-3.5 kg DQO/m³dia.
Tasa de carga biológica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ De acuerdo a la literatura y el tipo de caudal tratado, el rango correspondiente al arranque está entre 0.05-15 kgDQO/kgSV*dia, tasa que es necesaria aumentarla debido a las eficiencias del sistema. ✓ La máxima tasa (limite) depende de la actividad metanogenica, que para agua domestica va de de 0.05 a 0.15 kg DQO/m³dia. ✓ Rangos entre 0.30-0.50 kgDQO/kgSV*dia para el arranque en experimentos recientes no afectaron el pH y los AGV a pesar de ser determinantes de la estabilidad.
Velocidad de ascenso	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La máxima es relativa del tipo de lodo presente y de las cargas aplicadas. ✓ En condiciones de lodo floculento con cargas de 5.0-6.0 kgDQO/m³dia el promedio debería ser de 0.5-0.7 m/hora, con picos temporales por encima de 1.5-2.0 tolerables de 2-4 horas. ✓ En condiciones de lodo granular puede llegar a 10 m/hora
Altura del reactor	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se establece por el tipo de lodo inoculado, las cargas orgánicas aplicadas y/o volumétricas, pues esta última define las velocidades de ascenso impuestas.

²⁷ KATO, M.T. and FLORENCIO, L. (2001). Poster. The use of UASB reactors in small sewage treatment plants. Anaerobic digestion for sustainable development: papers of the farewell seminar of Prof. Dir. Ir.. Gatzke Lettinga, March 29-30, 2001. Wageningen, The Netherlands. Citado por: MRISHO M., Shaaban. (2003). Toward sustainable and robust on-site domestic wastewater treatment for all citizens. Thesis. Wageningen University. Pag 18.

Eficiencias	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Su estimación se hace principalmente a partir de relaciones empíricas surgidas de resultados experimentales. ✓ El desarrollo de modelos matemáticos tiene aún poca aplicación sin embargo es importante seguir lo emprendido por la IWA en su grupo de trabajo con el Modelo Anaerobio No.1 (Blastone et al., 2002).
Sistema de distribución de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Esencial que sea uniforme para poder obtener un desempeño que asegure un contacto directo entre la biomasa y el sustrato. ✓ Evitar la generación de cortos circuitos y zonas muertas porque para el tratamiento a bajas concentraciones y temperaturas el biogás no podría generar apropiadas condiciones de mezcla en la unidad.
Separador de fases líquida-sólida-gaseosa	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conservar el lodo dentro del reactor garantiza la operación del sistema con altos TRS (lodo de edad extendida). ✓ Su eficacia dependerá de las características del agua residual, el lodo presente, la carga orgánica aplicada, la producción esperada de biogás y las dimensiones del reactor.
Colector del efluente	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Para la zona de lavado con vertederos en V es necesario tener presente el nivel del efluente y ubicar a lo largo de esta estructuras deflectores de espuma. ✓ Ubicar salidas sumergidas para evitar la turbulencia cerca de los vertederos. ✓ Para tubos perforados pendiente de 1% como mínimo.
Colector de gas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La emisión de metano es de cuidado por su combustible condición, por lo que el biogás producido debe ser capturado, medio y consumido de alguna manera.
Muestreador de lodo y sistema de descarga	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Con el fin de caracterizar la biomasa a distintos niveles la instalación de válvulas de bola es recomendable desde la base, con un espaciamiento de 50 cm y 1½-2 pulgadas de diámetro. ✓ En reactores a escala real al menos 2 puntos deben considerarse para liberar al sistema del exceso de lodo y material inerte acumulado

Fuente: von Sperling y Chernicharo, 2005.

4. METODOLOGIA

El arranque y operación de reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) a escala laboratorio simulando dos condiciones de flujo en la entrada, fue una acción progresiva y monitoreada en distintas etapas que se acompañó en un lapso puntual del ensayo de AME, todo siguiendo recomendaciones descritas en:

- UNIVALLE et al. (1987) además de von Sperling y Chernicharo (2005), para la operación UASB.
- El *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21th ed., 2005)* al desarrollar las pruebas de laboratorio.
- La serie de publicaciones hechas en la Universidad del Valle (EIDENAR, 2010) al desarrollar ensayos de Actividad Metanogenica, tras seguir la línea de Jim Field (1987), Rocha (2003) entre otros.

ETAPA 1. VALORACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD Y CALIDAD DE FLUJO

Buscando describir el conjunto de regímenes que fluyeron en los reactores tipo RAP, se exploraron índices de monitoreo disponibles a la época que de manera continua asociaron la operación desarrollada en esta etapa de la PTAR UPB.

De cada jornada se obtuvieron valoraciones horarias, correspondientes a caudales y pH, que agrupadas por cerca de dos semanas derivaron en el particular señalamiento de mínimos y máximos. Ordenados los parámetros de acuerdo con su rol mediante gráficos (entrada o salida), estos fueron también útiles para establecer los volúmenes cotidianos de entrada (acumulados, distribuidos y almacenados) además de sus repercusiones para el tratamiento secundario y así hacer un diagnóstico preliminar de la marcha en el sistema.

Valoración de la discontinuidad. De acuerdo con los comportamientos ajustados tenidos en cuenta para el riguroso seguimiento, las comunes situaciones se limitaron para generar soluciones tras el señalamiento de horarios cruciales en cada jornada.

Valoración de la calidad de flujo. La conducta extendida de los índices pH que está ligada a los flujos fue el recurso asumido para sugerir el posible escenario, en la actividad microbiológica. Por tanto, con jornadas agrupadas en dos series se exploraron alternativas para corregir “fallas” reiteradas al alimentar los reactores.

ETAPA 2. DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA DE FACTORES DE INHIBICIÓN

Las formas para establecer el desempeño de un cultivo anaerobio en lodo digerido tienen diversas opiniones (James et al., 1990; Soto, 1993; Rocha, 2003), sin embargo las indicaciones acogidas para el siguiente ensayo parten de la experiencia manifestada en UNIVALLE (Field, 1987²⁸; Patricia Torres²⁹, 2010) al estudiar el comportamiento de inóculos en el tratamiento de aguas residuales.

El montaje destinado para tal fin se denomina Actividad Metanogénica Específica –AME, y para el caso particular tuvo el apoyo de diversos sustratos que en circunstancias limitadas actuaron como fuente alimenticia para una misma población bacteriana.

Montaje para la determinación de la Actividad Metanogénica

Inoculo (lodo anaerobio). Producto del sistema RAP de la PTAR UPB, sembrado y sometido al contexto hidrodinámico ascendente, que tras cerca de 40 días de intervención se extrajo de los reactores UASB a escala laboratorio a través de sus segundas llaves (Figura 14). Con este se generó entonces una mezcla compuesta, dada la similitud de gran parte de los parámetros valorados hasta Agosto 23, y fue caracterizado en términos de los Sólidos Totales Volátiles (gSTV/L) previo a su interacción con los medios a ensayar.

La cantidad de lodo a sembrar se determinó de acuerdo con la Ecuación 1, teniendo en cuenta que su mezcla con el sustrato no debía superar el 90% del volumen de los recipientes fijados (R1).

$$V_1 = \frac{(V_2 C_2)}{C_1} \quad \text{Ecuación 1}$$

V_1 = Volumen de lodo a adicionar en R1 (ml)

C_1 = Concentración de STV inicial del lodo (mg/L)

V_2 = Volumen total de reacción o de mezcla (ml)

C_2 = Concentración que se desea garantizar en el reactor batch (mg/L)

²⁸ Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodo UASB: manual del curso. Universidad del Valle (Col); Corporación Autónoma Regional del Valle; Agricultural University of Wageningen, 1987. Título C.

²⁹ Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc. y Ph.D., Universidad Sao Paulo, Brasil.

Preparación de los sustratos orgánicos. El alimento a ser aplicado en los reactores batch (R1) es agua residual del tratamiento preliminar, caracterizada de acuerdo con ciertos términos de la Tabla 7, mientras que una fracción “representativa” pero menor corresponde a una preparación de elementos específicos. Las siguientes fueron entonces las alternativas expuestas:

Control: Blanco (agua destilada)

Sustrato 1: Agua residual UPB, afluyente (etapa preliminar) con pH > 8.0 unidades

Sustrato 2: Agua residual UPB, afluyente + Aporte de carbono (glucosa).

Fuentes de C: Panela pulverizada (azúcar al 99%)

Sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) – en 100g son del 72-84%

Glucosa ($C_6H_{12}O_6$) – en 100 son del 1-7.5%

Fructosa ($C_6H_{12}O_6$) – en 100g son del 1-7.5%

Sustrato 3: Agua residual UPB, afluyente, con aporte de acidez (reducción de su pH cerca a la neutralidad, H_2SO_4 0.1N).

Sustrato 4: Agua residual sintética – solución constituida por C:N:P en proporción de 350:5:1 como relación propia de un medio no acidificado, y dispone de tales características para que el medio permita el desarrollo bacteriano.

Fuente de Carbono: Panela pulverizada (azúcar 98%) - Sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$)

Fuente de Nitrógeno: $CO(NH_2)_2$

Fuente de Fósforo: KH_2PO_4

Micronutrientes

Empalme del ensayo y seguimiento. Su desarrollo fue de carácter simplificado, derivado de la línea trazada en diversas investigaciones. Las 4 alternativas de sustrato y el Blanco fueron por triplicado, donde cada reactor batch (R1, botella ámbar) simuló el proceso anaerobio en flujo discontinuo; mientras el segundo (R₂, botella transparente) con una solución de NaOH al 3% (Patricia Torres, 1995; citado por Gonzalez y otero, 2005) fue el receptor del biogás y generó un desplazamiento de la fase acuosa contenida.

La valoración volumétrica por esta vía es una medida más aproximada de la pauta alcanzada, pues el hidróxido de sodio tiene la propiedad de reaccionar con el CO_2 . Es entonces la manera indirecta de establecer el volumen de metano producido durante el tiempo del ensayo, donde con un promedio de 23.71°C se enmarcó la actividad por 12 días y medio.

Para mantener el dinamismo de la biomasa incubada cada R1 se agito regularmente de forma manual, al hacer la inspección del NaOH liberado tras el desplazamiento, buscando así impulsar el consumo máximo de la carga aplicada y constatar tendencias inhibitorias.

Las siguientes reacciones son entonces las que tienen lugar en R2 (Chernicaró, 2007):

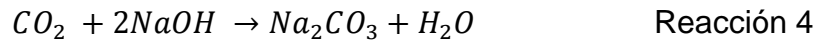
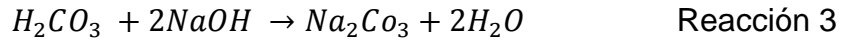
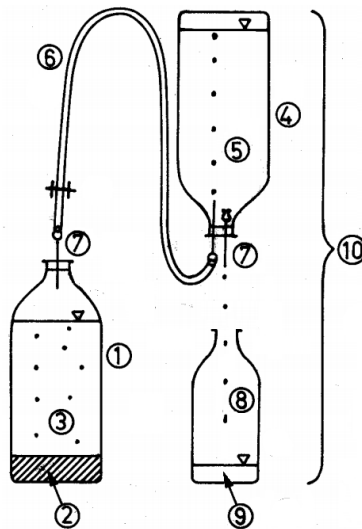


Figura 8. Configuración del ensayo AME



Fuente: Jawed y Tare, 1999; Editado por el Autor

1. R1 (Reactor batch, capacidad 500 ml)
2. Inoculo (lodo)
3. Sustrato
4. R2 (receptor del biogás, 500ml)
5. Solución NaOH al 3%, con el nivel de desplazamiento
6. Manguera de goma (en forma de U para evitar el paso de NaOH a R1)
7. Agujas hipodérmicas incrustadas en cada tapón hermético, para conducir el biogás generado en R₁ y liberar por desplazamiento el líquido retenido en R₂.
8. NaOH liberada de R2
9. Volumen acumulado de NaOH
10. Sistema de desplazamiento de líquido.

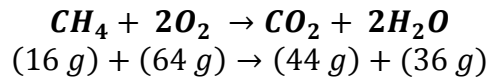
Conjunto de implementos utilizados en el ensayo:

- 15 botellas ambar (R1, 500 ml)
- 30 botellas transparentes (500 ml) – 15 cumpliendo como R2 y 15 auxiliares recibiendo la solución de NaOH desplazada.
- 15 Agujas hipodérmicas de acero inoxidable (en R2)
- 30 tapones, distribuidos en cada par de recipientes
- 15 Mangueras de caucho
- 15 Acoples de sujeción para cada R2
- 30 abrazaderas de fijación para cada tapón
- 1 Probeta

De acuerdo con la actividad diaria registrada durante la prueba, el cálculo AME implico conjugar las siguientes expresiones:

Producción de Metano. Estimación valorada a partir de la degradación de la DQO en los reactores, siguiendo el esquema de la Reacción 5, donde por cada mol de metano se consumen 2 moles de O₂. Por lo tanto, a condiciones normales de temperatura y presión (0°C = 273K; 1 atm), 22.4 L de CH₄ corresponden a 64 g DQO, es decir, 350 ml CH₄ por gramo DQO removida o reducida.

Reacción 5



Buscando corregir la producción teórica de CH₄ se aplicó la Ecuación 2, sugerida como factor para ajustar todo a los términos de temperatura y presión atmosférica en que se desarrolló el montaje.

Ecuación 2

$$K(t) = \frac{(P)(K)}{(R)(273 + T)}$$

K(t) = factor de corrección (gDQO/L)

P = presión atmosférica (atm)

R = constante de los gases (0.08206 atm*L/mol*°K)

K = carga orgánica digerida correspondiente a una mol de CH₄ (64gDQO/mol)

T = temperatura operacional del reactor (°C)

La ecuación general que determino la producción teórica de metano por gramo de DQO removida se complementó con la anterior y correspondió a:

Ecuación 3

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

V_{CH_4} = Volumen CH_4 producido (L)

DQO_{CH_4} = carga DQO removida del reactor convertida en CH_4 (gDQO)

$K(t)$ = Factor de corrección para la temperatura operacional de reactor (g DQO/L)

Relacionado el volumen de NaOH desplazado vía metano por unidad de tiempo, la fracción de materia orgánica convertida que deriva en la AME fue calculada de acuerdo con la ecuación 4.

$$AME \left(\frac{gDQO_{CH_4}}{gSTV \text{ dia}} \right) = \frac{(m)(24)}{(V_{CH_4})(M)} = \frac{\left(\frac{dV_{CH_4}}{dt} \right)(24)}{(FC)(V)(STV)} \quad \text{Ecuación 4}$$

m = Pendiente máxima en la curva producción de metano (V_{CH_4} acumulado vs. Tiempo)

M = Masa de lodo

V = Volumen efectivo del líquido en digester

Análisis de resultados. Los distintos sustratos fueron “valorados” de acuerdo con el volumen acumulado de NaOH (ml), y dentro de cada grupo se acogió el de mayor regularidad y rendimiento a través del tiempo para ser comparado con los otros.

Las determinaciones puntuales de cada volumen de CH_4 producido como de la Actividad Metanogenica Especifica siguieron las ecuaciones referenciadas (2-4), lo cual permitió saber la capacidad de respuesta del inculo ante estímulos y/o factores de inhibición inmersos en el reactor.

ETAPA 3. EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN FLUJO CONTINUO Y DISCONTINUO DEL PAR REACTORES UASB

El arranque y operación de las unidades de tratamiento se suplió con tanques de almacenamiento (Figura 13), conforme a los requerimientos de las programaciones fijadas a través del tiempo (Tabla 6). Fueron dos vías las que alimentaron las ejecuciones pero la extensión de la segunda fue mayor por cuestiones prácticas, donde la transferencia hacia las columnas/reactores se hizo por vía de bombas dosificadoras y otras conexiones determinantes.

Especificaciones generales de las bombas peristálticas dosificadoras

- Marca: Blackstone, Hanna Instruments.
- Modelo: BL20-1
- Caudal Máximo: 18.3L/h (4.8 galones/h) @ 0.5 bar (7.4 psi), ajustable de 0 a 100% de la máxima capacidad de la bomba.
- Fuente de alimentación: 110/115Vac, 50/60Hz
- Máximo consumo de energía: 200W
- Peso: 3 kg

Figura 9. Bombas dosificadoras utilizadas en el tratamiento.



Fuente: El Autor

Especificaciones generales de los reactores UASB a escala laboratorio

Hechos de poliacrílico (calibre 5 mm) y constituidos por 3 secciones:

1. Base: caja de 0.306x0.296x0.100m (largo-ancho-alto), sellada con láminas de 0.36x0.35m, con llave de paso lateral para permitir la entrada del flujo. Para conceder el ascenso del agua residual se dispuso de una serie de orificios (perforaciones) en la cara que soporto la columna principal. El objetivo de este compartimiento era entonces permitir una presión constante además de un rápido contacto del agua residual con la biomasa implantada, evitando así albergar la acumulación de lodo y algas.
2. Columna principal: compartimiento de 0.306x0.296x1.25m que confino la biomasa dispuesta para efectuar el tratamiento a escala laboratorio, en el cual se buscó mejorar la capacidad de adsorción y entrapamiento del lodo inmerso. Posee cuatro llaves de paso ubicadas a distintas alturas, destinadas para la optativa caracterización del perfil de lodos.
3. Unidad Superior: conformada por una campana en forma piramidal, (0.306x0.296x0.14m), que adherida a una lámina base de 0.36x0.35m permite gracias a una serie de perforaciones retener la biomasa arrastrada por el biogás en el ascenso y liberar este último. En torno a la campana están las aberturas del flujo líquido y dispuestas dos barreras (10 cm, altura), que espaciadas y debidamente acondicionadas permiten la sedimentación del material sólido contenido y poder entregar así un caudal “clarificado” a través de una boquilla metálica enroscada (a 8 cm de altura desde la lámina base).

Figura 10. Reactores UASB a escala laboratorio acoplados



Fuente: El autor

Lodo sembrado en los reactores UASB. Proveniente del sistema RAP UPB en servicio para la época, tras la apertura de su válvula de descarga y extraído del foso de succión de lodos. Fueron aproximadamente 0.057m^3 de biomasa diluida que después de ser sometida a lavado se repartió equitativamente en las “columnas”, y donde pasados los primeros días la sedimentación genero un perfil de 50 cm aproximadamente.

Figura 11. Lodo sembrado en los reactores UASB



Figura 12. Lodo asentado previo al inicio formal de las operaciones.



Fuentes: El Autor

Operación y seguimiento. Comprendió para las unidades de tratamiento buscar afianzar su desarrollo a medida que los resultados eran favorables, por lo que hechos ciertos ajustes fueron cuatro las fases derivadas para el tránsito hacia las programaciones planteadas.

Tabla 6. Programación aplicada a lo largo de la depuración

Fase	Operación UASB 1	Operación UASB 2
Arranque	Continua	Continua
Segunda	Continua estable	Continua estable
Tercera	Continua estable	Discontinua estable
Cuarta	Discontinua fuerte	Discontinua fuerte

Figura 13. Sistema configurado para la ejecución del tratamiento



Figura 14. Perfil de llaves acondicionadas en los reactores



Fuentes: El Autor

Capacidad de los reactores= 0.11322 m^3 (UASB1) y 0.11549 m^3 (UASB2)

Tanque de Almacenamiento 1 (TA #1) = 0.1655 m^3 agua residual

Tanque de Almacenamiento 2 (TA #2) = 0.1718 m^3 agua residual

Para garantizar una buena asimilación del sustrato por parte de las bacterias y mantener una carga orgánica inicial baja se planteó trabajar con altos tiempos de retención hidráulica al comenzar la operación (Seghezzi, 2004), tentativamente de 24 horas³⁰ como se indica en un estudio realizado en UNIVALLE para el arranque de este tipo de unidades depuradoras.

La condición del sustrato incorporado y las descargas UASB fueron determinadas de acuerdo con los parámetros señalados en la Tabla 7. Aquellas medidas de control durante todo el ejercicio advertirán los alcances en el tiempo para llevar a cabo ajustes en el TRH, tras la interacción anaerobia sobre el flujo, y su aplicación va de acuerdo con la complejidad y factibilidad del caso.

³⁰ Torres, Rodriguez, Barba, & Luis, 2009

Tabla 7. Parámetros de control aplicados para en el sistema

PARAMETROS*	UNIDAD	METODO Y REFERENCIA	FRECUENCIA
pH	-	4500-H ⁺ -B Potenciométrico	Diaria
Alcalinidad Parcial** Alcalinidad Intermedia**	mg/L CaCO ₃	Potenciometrico (Ripley et al. 1986)	Diaria
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	meq/L	5560-C Destilación	3 veces por semana
DQO	mg/L O ₂	5220-C Titulométrico	3 veces por semana
DBO ₅ ***	mg/L O ₂	5210-B Prueba de los 5 días	-
Solidos Totales	mg/L	2540-D	Variable Instancia
Solidos Totales Volátiles	mg/L	2540-E	Variable Instancia
Nitrógeno Total Kjendhal***	mg/L	4500-N	-
Fosforo Total***	mg/L P-PO ₄	4500-P-E	-

* La mayoría de las valoraciones por via Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 21th edition, 2005.

** Métodos rápidos de verificación NO ESTANDARIZADOS, publicados en revistas científicas.

*** Parámetros valorados con limitada continuidad

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 ETAPA 1. VALORACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD Y CALIDAD DE FLUJO DEL RAP – UPB.

El seguimiento de la operación en reactores tipo RAP consolida aquí los índices que dinamizaron el sistema por dos semanas, omitiendo el domingo (144-168 horas), a partir de comportamientos puntuales de caudal y pH. Se limitaron para el afluente de lunes a viernes por espacios de 14 horas (6am-8pm) y durante los sábados por la jornada matinal (7am-12pm), sin embargo para todos los flujos depurados la extensión de los términos diarios fue desde el tercer ejercicio horario registrado hasta el cierre respectivo.

Tabla 8. Análisis por dos semanas del afluente sistema PTAR

Día	Caudal Predominante (L/seg)	Caudal Máximo (L/seg)		pH correspondiente al caudal máximo		pH Predominante	pH máximo
		Mañana	Tarde	Mañana	Tarde		
(01) Lunes	Intervalo de [0.56-0.95]	1.43 (10 am)	1.08 (4 pm)	8.40	8.43	Intervalo de [8.23-8.51]	En torno a 8.80 (12 y 7 pm)
(02) Martes	[0.50-0.88]	1.35 (10 am)	1.84 (2 pm)	8.66		[8.43-8.69]	En torno a 8.68 (9-10 am) (5 y 8 pm)
(03) Miércoles	[0.82-1.08]	1.27 (10 am)	1.17 (3 pm)	8.63	7.99	[8.62-8.83]	8.83 (8 pm)
(04) Jueves	[1.02-1.10]	1.39 (10 am)	1.19 (3 pm)	8.46	7.92	[8.17-8.69]	En torno a 8.67 (6-8 pm)
(05) Viernes	[0.61-0.73] [1.02-1.12]	1.17 (10 am)	1.12 (4 pm)	8.60	8.49	[8.29-8.80]	8.80 (6 pm)
(06) Sábado	[0.23-0.47]	1.05 (11 am)	-	8.47	-	[8.47-8.71]	8.71 (12 pm)
(07) Domingo	-	-	-	-	-	-	-
(08) Lunes	[0.51-0.89]	1.77 (10 am)	1.67 (2 pm)	8.44	8.46	[8.44-8.66]	8.71 (5 pm)
(09) Martes	[0.68-1.10]	1.77 (10 am)	1.49 (2 pm)	8.80	8.42	[8.58-8.70]	8.82 (7 am)
(10) Miércoles	[0.58-1.16]	1.84 (10 am)	1.36 (4 pm)	8.73	8.45	[8.54-8.85]	8.89 (6 pm)
(11) Jueves	[0.68-1.21]	2.05 (10 am)	1.36 (2 pm)	8.79	8.56	[8.46-8.63]	8.85 (7 pm)
(12) Viernes	[0.64-1.03] 1.36-1.46 <i>Se reiteran entre el medio día y las 3 pm</i>	1.40 (10 am)	1.46 (3 pm)	8.62		[8.42-8.89]	8.89 (7 pm)
(13) Sábado	[0.42-0.82]	0.81 (10 am)	-	8.22	-	8.22, 8.32 y 8.75	8.75 (12 pm)

Durante la segunda semana el aumento de los vertimientos fue producto de la habitual poblacional que acude a la institución.

El dinamismo de los flujos advirtió de manera recurrente que a las 10 horas las descargas alcanzan los mayores términos mientras que para la tarde estos van de 2 a 4 pm. El pH por su parte se ubicó generalmente superior a las 8.40 unidades, en los más notables espacios del día, lo cual implica que debe encontrarse un medio para regular tales pautas.

Tabla 9. Análisis por dos semanas del efluente sistema RAP

Día	Caudal Predominante (L/seg)	Caudal Máximo (L/seg)	pH correspondiente al caudal máximo	pH Predominante	pH Máximo
(01) Lunes	[0.50-0.68] Entre el medio día y el cierre nocturno	0.77 (4 pm)	7.71	Intervalo de [7.68-7.75]	Entorno a 7.70 (1-6 pm)
(02) Martes	[0.44-1.00]	1.05 (4 pm)	7.81	[7.71-7.81]	7.86 (7 pm)
(03) Miércoles	[0.60-0.86]	1.05 (6 pm)	7.78	[7.73-7.78]	7.91 (9 am)
(04) Jueves	[0.63-0.93]	0.92 (4 pm)	7.84	[7.70-7.86]	7.95 (8 pm)
(05) Viernes	[0.78-1.02]	1.02 (1 pm)	7.81	[7.81-7.93]	8.04 (9 am)
(06) Sábado	0.06, 0.05 y 0.04 Promedio 0.05	0.06 (10 am)	7.97	7.97 y 8.00	Entorno a 7.99*
(07) Domingo	-	-	-	-	-
(08) Lunes	[0.66-0.77]	0.95 (6 pm)	7.73	[7.73-7.89]	7.89 (4 pm)
(09) Martes	[0.68-0.74]	0.94 (5 pm)	7.90	[7.88-7.95]	8.01 (9 am)
(10) Miércoles	[0.64-0.72]	0.99 (6 pm)	7.86	[7.81-7.90]	8.03 (9 am)
(11) Jueves	[0.56-0.72]	0.82 (3 pm)	7.81	[7.86-8.00]	8.04 (9 am)
(12) Viernes	[0.61-0.72]	0.91 (7 pm)	7.92	[7.88-7.94]	8.09 (10 am)
(13) Sábado	0.02, 0.19 y 0.33 Promedio 0.18	0.33 (12 pm)	7.91	8.17, 7.88 y 7.91	8.17* (10 am)

*Tres índices registrados

Superado el tratamiento en unidad RAP la entrega líquida representativa se da entre las 4 y 6 pm. El sistema logra reducciones en el pH de 0.6-0.7 con respecto al afluente y se ubica generalmente por debajo de 8.0 unidades, hecho que deberá valorarse igual en el tercer ciclo de remoción.

En las Figuras 15 y 16 se reseñan comparativamente los parámetros valorados en la entrada y salida, que al ser desglosados conforman los índices de las tablas 8 y 9.

Figura 15. Comportamiento extendido del flujo en el sistema PTAR UPB

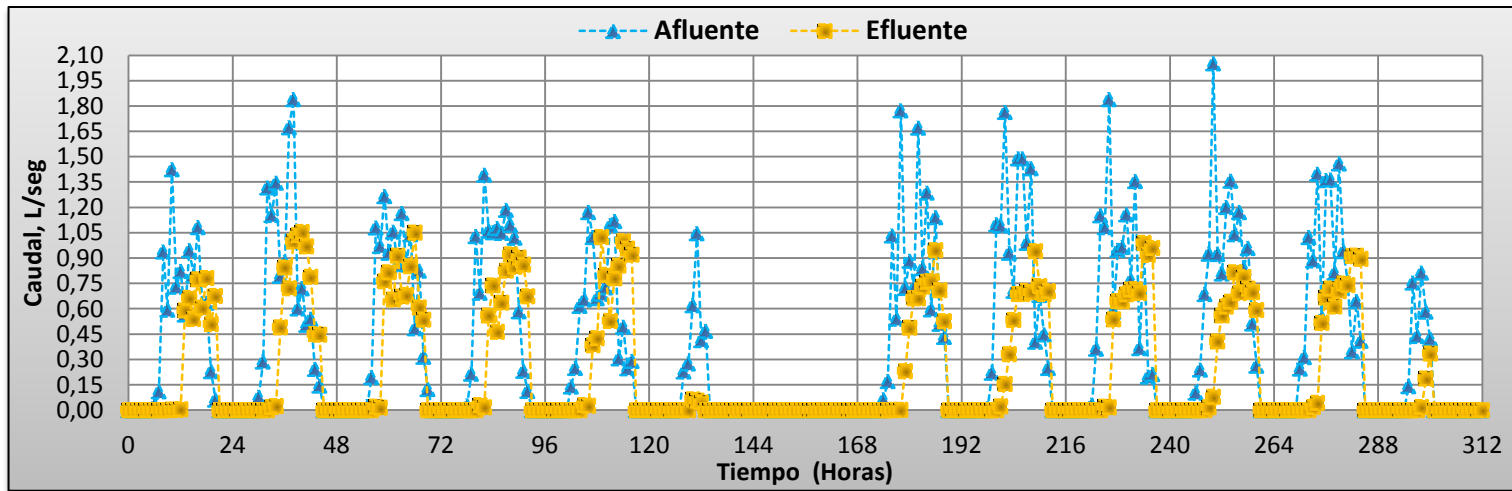
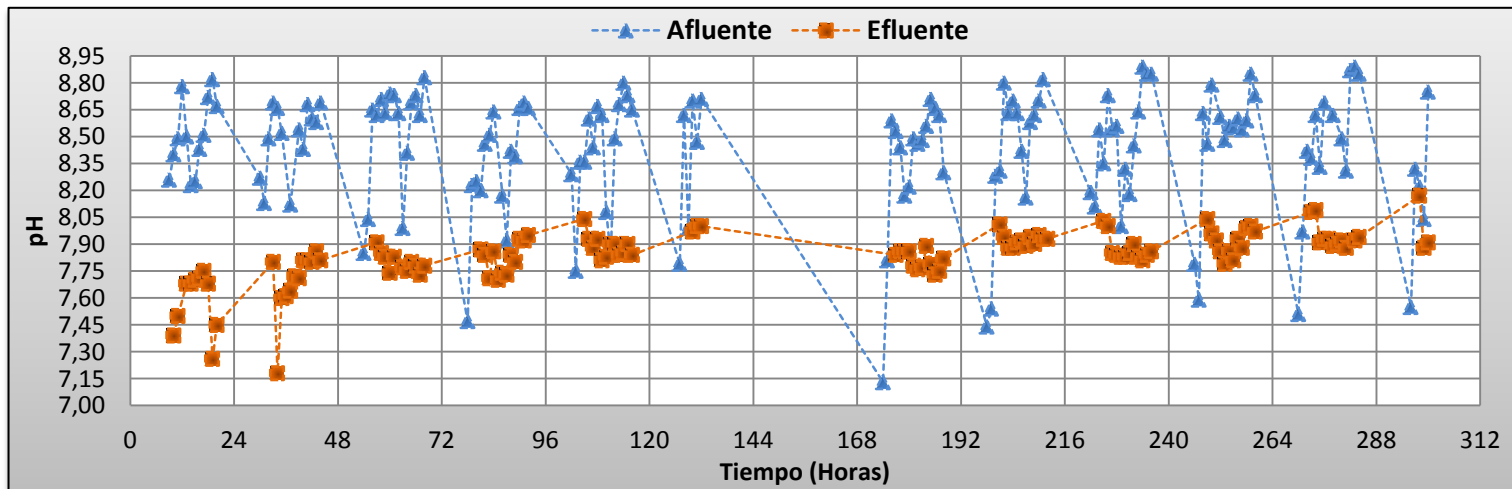


Figura 16. Comportamiento extendido del pH en el sistema PTAR UPB



En términos puntuales de mínimos y máximos la Figura 17 combina las destacadas referencias del afluente, donde a partir de las 8 am y por un término de 10 horas se asumieron las cifras que más influyeron en la dinámica cotidiana. Se puede resumir que durante la semana 1 y 2 los caudales mínimos fueron predominantemente de $[\approx 0.50-0.80]$ mientras los máximos se movieron rondando el $[1.10-1.40]$ y $[1.40-1.85]$ L/seg respectivamente.

La perspectiva del pH notifica que los niveles inferiores fueron de $[8.26-7.84]$ y después “ascendieron” de $[8.17-8.35]$, entretanto los destacados índices superiores revelaron rangos de $[8.62-8.80]$ y $[8.59-8.87]$ durante los lapsos referidos. Por tanto, la actividad biológica de los reactores no parece encontrar en estas circunstancias un medio idóneo para su desarrollo pues los choques puntuales no son amortiguados o no hay la posibilidad de generar una amplia mezcla del material disuelto.

Por otro lado los índices teóricos llevan a concluir que con un mínimo de 0.307 L/seg (113 horas) el TRH sea de 15.41 horas y su eficiencia del 77.83%. Mientras que su contraparte, con 2.053 L/seg (250 horas) limite el TRH a 2.30 horas con un éxito del 42.87%. No obstante, la situación al ser contrastada con el suministro en PTAR se reduce pues la degradación en DQO es del 28.40%.

Las respuestas al superar el tratamiento secundario notificaron, según la Figura 18, que el pH alcanzo una relativa continuidad al manejar pautas semanales de $[7.70-8.00]$ y $[7.80-8.10]$. Hecho que sin duda conmina a la operación a dar mayores garantías, tras las “holgadas” reducciones, ya que estas aún no se ajustan al rango ideal para cumplir con la digestión anaerobia (6.3 a 7.8)³¹.

Al asumir en conjunto el flujo de agua residual obtenido en distintas jornadas este señalo que bajo el influjo de 5500 personas³² 0.429 L/seg ($1.54 \text{ m}^3/\text{h}$) en promedio se derivaron hacia el sistema. Lo cual conlleva a decir, que si se mantuviera tal constante existiría teóricamente un TRH de ≈ 22.06 horas y depuraciones del 74.76% por reactor RAP de 17.03 m^3 útiles. Situación que “coincide” para la unidad en términos de eficiencia cuando la rigurosidad toma una carga de $0.5 \text{ kgDBO} \cdot \text{m}^3/\text{día}$ y capacidad de tratamiento del 50% en orgánico a partir de 1000 mg/L DQO , pues 0.197 L/seg (0.394 l/seg, el par reactores) sería el índice a fijar y por ende el TRH debería ser de 24 horas con $\approx 75.60\%$ de remoción.

Por lo tanto, aunque el índice de rendimiento es fruto del seguimiento desarrollado y ayuda a recrear una perspectiva, su proyección debe ajustarse a mayores necesidades para así optimizar los espacios en cuestión.

³¹ van Haandel y Lettinga, 1994

³² Proyección 2005-2009. Departamento de planeación, Universidad Pontificia Bolivariana.

Figura 17. Caudal y pH afluente PTAR UPB (Conjugación de los índices mínimos y máximos entre 8 am y 6 pm).

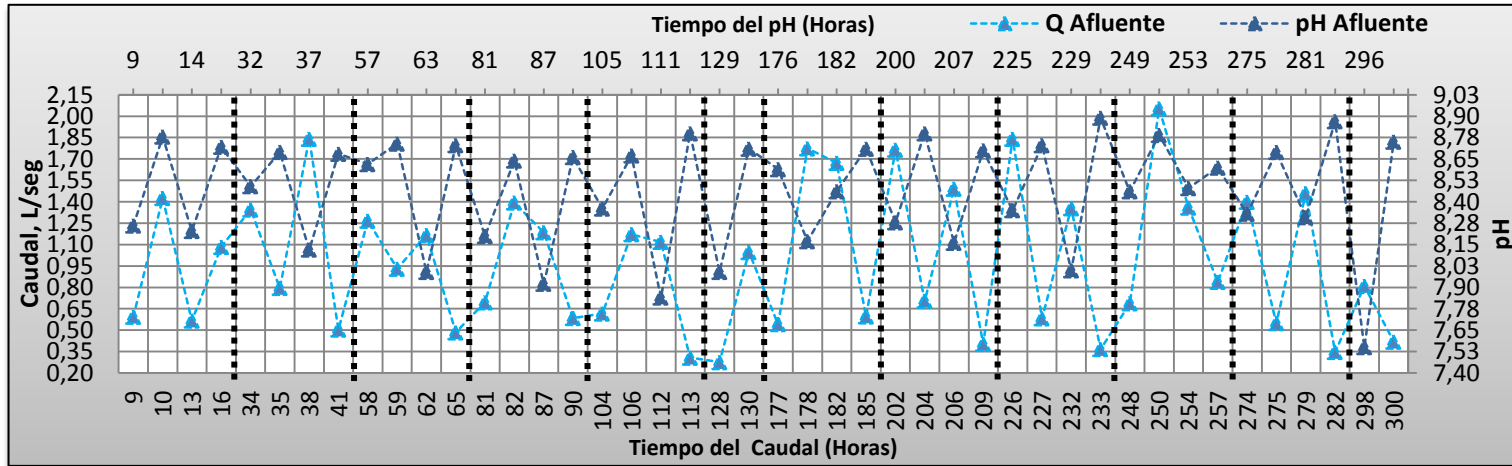
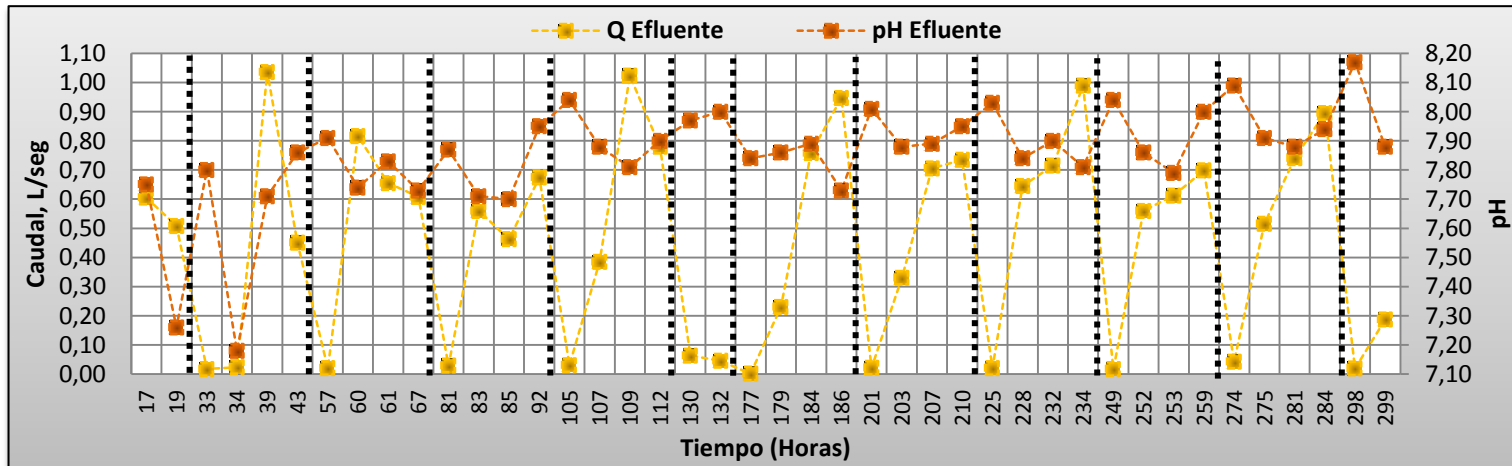


Figura 18. pH y caudal efluente PTAR UPB (Mínimos y máximos del parámetro relevante al ejecutar el monitoreo).



Los perfiles de caudales distribuidos en el sistema se enuncian en las Figuras 19 y 20, donde la referencia de rectas tangenciales en pautas de llenado y vaciado ayudo a fortalecer la visión del periodo reiterado entre la definida base poblacional.

De acuerdo con la sumatoria de masas relacionada en la Figura 19, que permite definir volúmenes de operación y flujos distribuidos (marcha del reactor por 24 horas), 0.43 L/seg deberían entrar regulados al sistema de tratamiento para lograr una eficacia del 73.75%.

Figura 19. Semana 1 - Sumatoria de volúmenes en tránsito por los reactores anaerobios RAP UPB (Lunes-Sábado matinal).

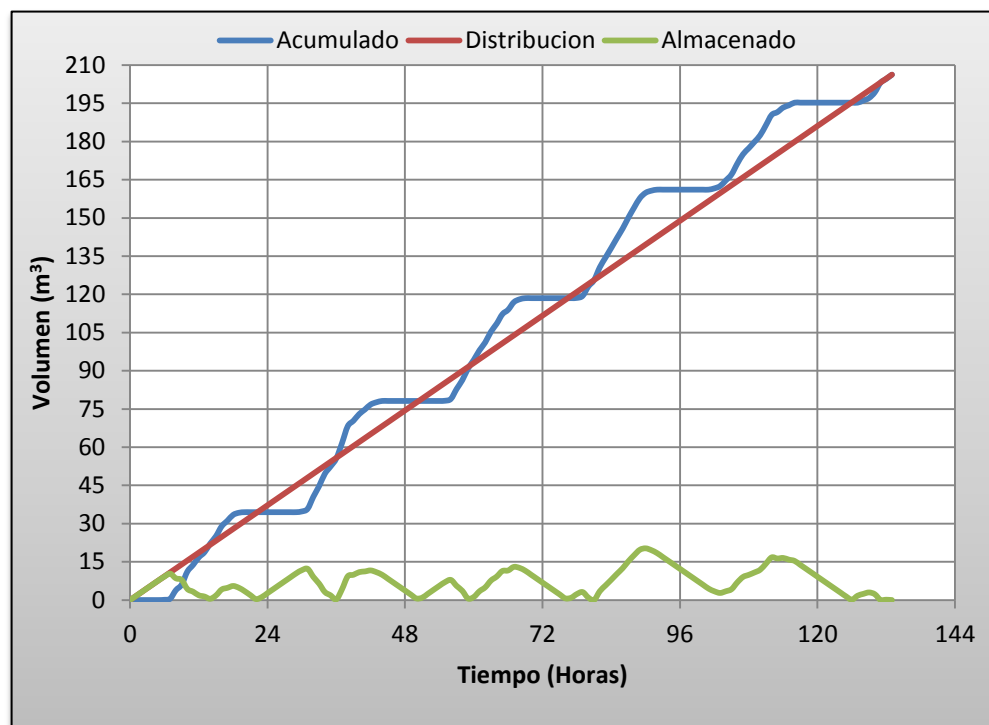
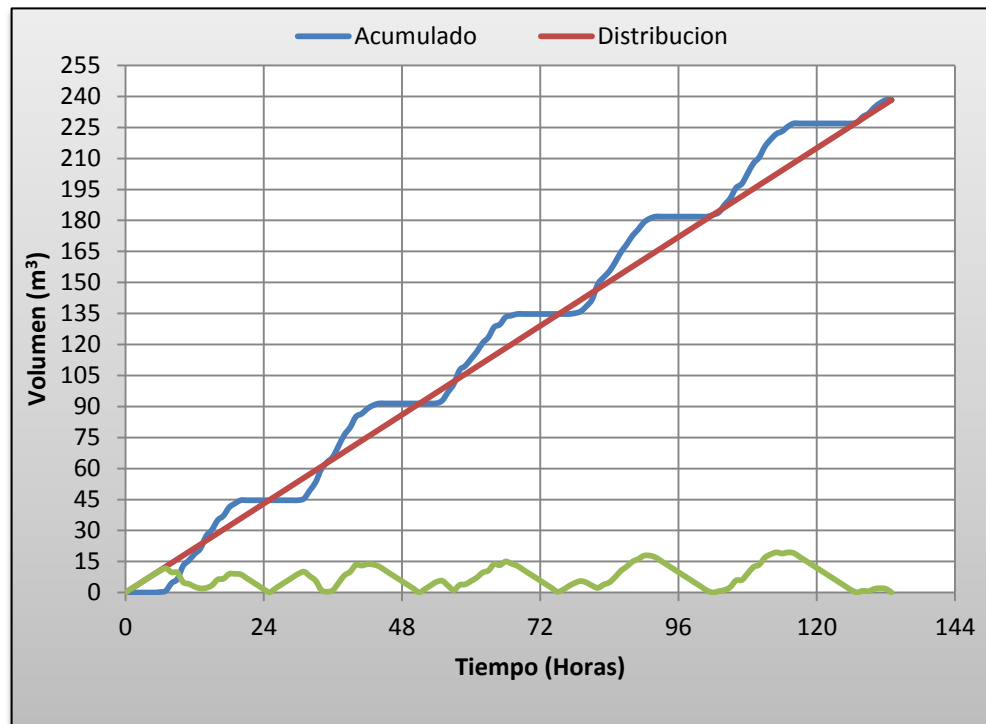


Figura 20. Semana 2 - Sumatoria de volúmenes en tránsito por los reactores anaerobios PTAR UPB – (Lun-Sab)



Para la recopilación de flujos advertida en la Figura 20, al acoger volúmenes de trabajo además de corrientes líquidas (dinámica de operación por 24 horas), estos indican que hacia el sistema se deben liberar 0.50 L/seg para alcanzar un éxito del 71.78% en la operación.

A tener en cuenta que este lapso representa las descargas de una población flotante mayor.

5.2 ETAPA 2. DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA DE FACTORES DE INHIBICIÓN

5.2.1 Caracterización del inoculo

Producto del sistema RAP de la PTAR UPB, sembrado y sometido al contexto hidrodinámico ascendente, que tras cerca de 40 días de intervención fue extraído de los reactores a escala laboratorio a través de sus segundas llaves (Figura 14). Con este se generó una mezcla compuesta, dados los aceptables resultados logrados en la fase continua estable UASB hasta agosto 23, y fue caracterizado en términos de los Sólidos Totales Volátiles (gSTV/L) en distintas etapas previo a su interacción con los medios fijados.

Tabla 10. Resultados preliminares del inoculo abonado para el ensayo AME

PARAMETRO	Junio 17		Julio 29		Agosto 17	
	UASB 1	UASB 2	UASB 1	UASB 2	UASB 1	UASB 2
Volumen de muestra (ml)	15	15	30	30	15	15
Sólidos Totales (mg/L)	425773.33	61360.00	63840.00	42246.67	72180.00	103786.67
ST promedio (mg/L)	243566.66		53043.33		87983.33	
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	143860	21826.67	22566.67	16213.33	29520.00	37.913.33
STV promedio (mg/L)	82843.36		19390.00		<u>33716.67</u>	
Relación STV/ST	34.01		36.86		38.714	

La progresiva exposición del lodo anaerobio ante un flujo continuo reseña parcialmente en los apartados de la Tabla 10 las pautas logradas. Se advierte por un lado pérdida de biomasa (UASB 1) mientras que el complemento del sistema (UASB 2) asciende en la retención del material en suspensión.

5.2.2 Caracterización del sustrato

Corresponde a una muestra del afluente PTAR UPB que a primeras horas de la mañana ($\approx 7:45$ am) se recolecto para hacerle una serie de análisis rutinarios, próxima la fecha del montaje. En la tabla 11 se aprecian las cifras más estrechas que tuvieron lugar.

Tabla 11. Seguimiento del sustrato a aplicar en el ensayo AME

PARAMETRO	Agosto 17 (miércoles)	Agosto 22 (lunes)	Agosto 26 (viernes)
pH	8.86	8.27	8.30
Alcalinidad Parcial (mg/L CaCO ₃)	390	210	335
Alcalinidad Intermedia (mg/L CaCO ₃)	95	70	115
DQO (mg/L O ₂)	1062.40	678.40	<u>552.96</u>

Solidos Totales (mg/L)	1524	916	694.53
Solidos Totales Volátiles (mg/L)	934	395	1234.84

5.2.3 Ensayo AME y Resultados

Pasados cerca de 2 meses de operación en los reactores UASB, de las segundas llaves (ver Figura 14) fue obtenida una muestra compuesta de alrededor de 400 ml

Para los casos particulares, por cada R1 (reactor batch) se agregaron 350 ml de sustrato y 20.761 ml de lodo

$$V_1 = \frac{(350 \text{ ml})(2000 \text{ mg/l})}{33715.65 \text{ mg/l}} = 20.761 \text{ ml}$$

Figura 21. Montaje AME sin agitación (reactores batch y receptores de biogas)



Figura 22. Montaje AME sin agitación en detalle



Condiciones de la prueba:

- Temperatura promedio durante la prueba = **23.71°C = 296.86 K ≈ 297 K** (Fuente: IDEAM - ver Anexo 3)
- Presión atmosférica promedio durante la prueba = **0.894 atm = 679.704 mm Hg**
- Concentración del lodo = **33.7167 g STV/L**
- Concentración recomendada de lodo a adicionar = **2.00g STV/L**
- Volumen en reactor = **350 ml de sustrato**

Tabla 12. Registros matemáticos AME de las muestras con mayor regularidad

Muestra	Ecuación	Correlación
Blanco No.2	$y = 2.9187x + 2.4802$	$R^2=0.9854$ ($r=0.992687530$)
AR Normal No.3	$y = 5.9286x + 0.1016$	$R^2=0.9850$ ($r=0.992471662$)
AR + Fte C No.1	$y = 12.663x + 4.5385$	$R^2=0.9961$ ($r=0.998048095$)
AR Acidificada No.1	$y = 3.8775x + 3.7659$	$R^2=0.9859$ ($r=0.992924972$)
Sintética No.2 (C:N:P)	$y = 2.8742x + 5.0396$	$R^2=0.9704$ ($r=0.985088828$)

Tabla 13. Resultados de los ensayos AME

Muestra	Field (1987)		k(t)	UNIVALLE (2010)		
	Factor de Conversión	AME		Factor de Conversión	V _{CH4} (L)	AME
Blanco	438.28	0.228	2.35	425.54	27.23	0.235
AR Normal		0.303				0.312
AR + Fte C	$\frac{ml_{CH_4}}{gDQO_{removida}}$	0.991	$\frac{gDQO}{l}$	$\frac{ml_{CH_4}}{gDQO_{removida}}$		1.020
AR Acidificada		0.303				0.312
Sintética (C:N:P)		0.225				0.232

En la Tabla 12 se agrupan los factores matemáticos lineales (ver Anexo 5) de mayor regularidad, que extendidos al apartado de resultados advierten la producción aproximada de CH₄ por sustrato. Previamente los volúmenes totales desplazados fueron de 38.20 ml en Blanco, 71.25 ml en AR normal, 156.25 ml en aplicación con fuente de carbono, 49.50 ml en AR acidificada y 38.60 ml para la preparación sintética.

La temperatura como magnitud destacada que influye en la conducta del conglomerado bacteriano, fue acogida hora tras hora junto con los índices de presión ejercida en Bucaramanga a través del IDEAM.

Los hechos particulares demostraron que:

- Comparativamente el blanco y la preparación sintética fueron los mínimos puntos al estar en torno a 0.230 g CH₄ .DQO/g SSV*día.
- El AR normal y AR acidificada se movieron próximos a 0.308 g CH₄ .DQO/g SSV*día.

Estas cuatro muestras dispares que expresan estrechas diferencias entre metodologías (Field y UNIVALLE) se ajustan a lo expresado por M.H. ISA et al (1993) en pruebas AME, pues para ellos en un intervalo de 20-30°C se generarían de 0.210-0.370 gCH₄ .DQO/g SSV*día.

Sin embargo el ensayo que mayor éxito ofreció fue el que conto con aportes de carbono, al exhibir índices en torno al 1.10 g CH₄ .DQO/g SSV*día. Es entonces tal la condición la que limita el dinamismo anaerobio, el hecho de no disponer de un sustrato “enriquecido” que estimule con largo aliento la serie de pasos a cumplir al producir metano.

5.3 ETAPA 3. EVALUACION DE LA CONDICION DE OPERACIÓN EN FLUJO CONTINUO Y DISCONTINUO DE DOS REACTORES UASB.

La operación de los reactores UASB a escala laboratorio dispuestos dentro de las instalaciones PTAR UPB se ejecutó por cerca de 5 meses y afronto recesos, dirigidos a labores de ajuste y/o simular temporadas vacacionales. La condición incesante más extendida en las *columnas* fue por un mes y siete días (calendario, no hábiles), lo cual permitió conocer respuestas biológicas al optimizar programaciones.

Para el ritmo intermitente de flujo en la entrada su aplicación inicialmente fue dirigida a un reactor bajo el régimen de un temporizador, como medida de exploración ante el “fuerte choque” que se quería generar y se cumplió al trabajar en el modo eléctrico PTAR UPB (bombas de succión que se activan en la caja de elevación).

5.3.1 Fase 1. Operación continua durante el arranque

Como etapa crítica para cualquier vía de tratamiento anaerobio el inicio de las operaciones implico el seguimiento rutinario de los progresos alcanzados por el sistema, en términos de su paso hacia la estabilización y la relevante remoción de la materia orgánica. En el medio acuoso fijado para el desarrollo de la prueba, dada la turbulencia, se estaba generando la adaptación bacteriana para una efectiva conversión del sustrato hasta su mínima expresión (CH₄ y CO₂).

El afluente se derivó del tanque de bombeo Sistema RAP UPB y presento evidentes reducciones en su carga contaminante (junio), razón que justifica el nivel de los parámetros obtenidos tras someter todo a una depuración. La condición de operación podría entonces considerarse limitada, aun cuando el inculo fue extraído de la misma PTAR, pero es útil para definir los eventos en situaciones “extremas”.

Tabla 14. Condiciones operacionales iniciales reactores UASB.

FECHA	Reactor UASB No.1		Reactor UASB No.2	
	Flujo (m ³ /h)	TRH _{1,1} teórico	Flujo (m ³ /h)	TRH _{1,2} teórico
13/06/2011	0.0048	23:35:15.00	0.0048	24.03:36.60
05/07/2011				

El flujo de entrada durante los TRH₁ fue similar en ambos reactores y busco acercarse al valor típico de 24 horas³³, para el arranque de digestores anaerobios tratando agua residual doméstica. Las muestras fueron tomadas de acuerdo al ciclo de tratamiento y valoradas en la mayoría de los casos 3 veces por semana (lunes, miércoles y viernes).

³³ Torres, Rodriguez, Barba, & Luis, 2009

5.3.1.1 pH y Alcalinidad (Relación AI/AP) – fase de arranque

El comportamiento del pH además de la relación alcalinidad intermedia y alcalinidad parcial (AI/AP), para el sistema que integro el tratamiento son tratados en las Figuras 23 y 24 como magnitudes básicas de control a suscribir durante la operación.

La entrada se movió por lo general para la primera magnitud entre 7.20 y 7.40, y registró a 7.88 y 6.78 como los valores por fuera de la “tendencia”. Su índice AI/AP iniciando fue discontinuo, de 0.27 a 0.63 (junio 13 al 20); luego la serie fue más estrecha, [0.42 – 0.52], y finalizó con una nueva irregularidad de 0.65 a 0.34.

En el arranque de los reactores, fijados TRH y numeraciones aleatorias (ej. TRH_{1.1}, primera programación para el UASB₁), se experimentaron ligeras variaciones de pH con rangos entre [7.26 – 7.59] para Efluente 1 (E1) y [7.23 – 7.65] para Efluente 2 (E2). Tales intervalos en teoría favorecían el desarrollo de la digestión anaerobia pero esencialmente la actividad metanogénica, como etapa de suma importancia dentro del tratamiento, porque de [6.30 – 7.80] es más probable que esta proceda (van Haandel, 1994; van Haandel y Lettinga, 1994) y permita reiterar el ciclo digestivo adecuadamente.

Sin embargo paralelo a tal situación, el manto de lodo expuesto bajo nuevos patrones hidrodinámicos (en relación al RAP UPB de donde fue extraído) demostró que la adaptación a este modelo ascendente de operación continua era una etapa crítica. Entre un proceder casi sincronizado de descensos, ascensos y “estabilidad”, la relación AI/AP para los efluentes señaló un rango de [0.23 – 0.63] en E1 y [0.19 – 0.74] en E2, donde predominaron valores por encima de 0.30 que es el límite de monitoreo fijado en sistemas de tratamiento anaerobio (Ripley et al, 1986).

Esta respuesta es probable que sea debida a la acumulación de subproductos de la digestión (Ácidos Grasos Volátiles –AGV) los cuales pudieron haber excedido la capacidad de consumo, dada la carencia de poblaciones bacterianas específicas que aprovecharan a un mismo ritmo lo generado en el medio. Sin embargo la capacidad buffer del entorno demostró su poder para neutralizar cualquier principio de acidificación en los reactores, lo cual es un síntoma normal ante aumentos de la proporción AI/AP, a pesar de no señalar relevantes diferencias de pH.

Figura 23. pH en el sistema – fase de arranque

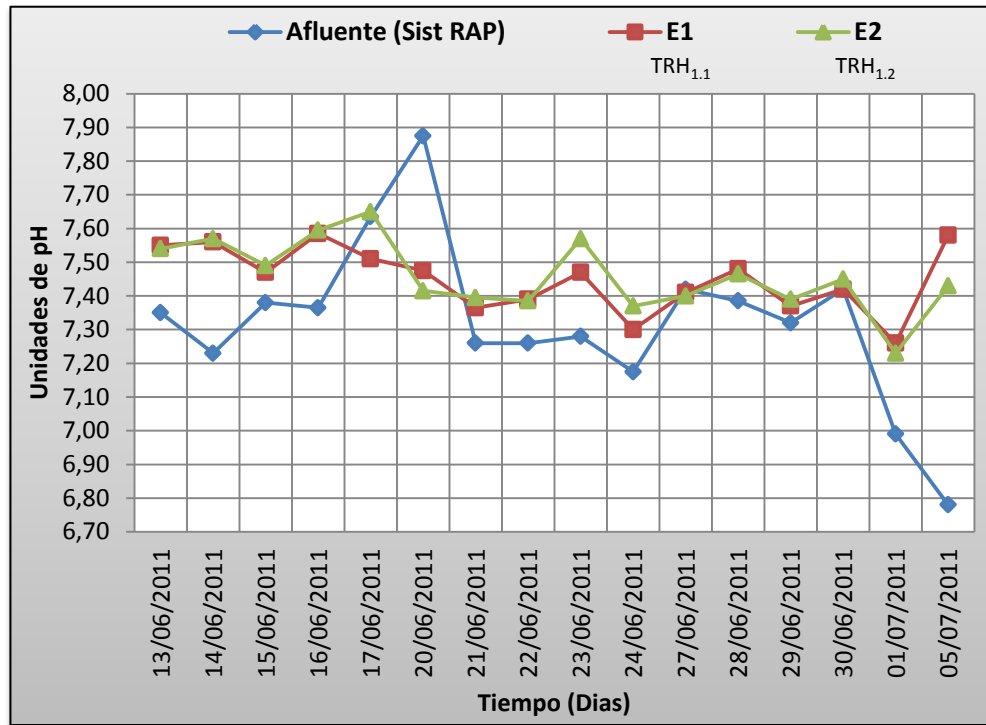
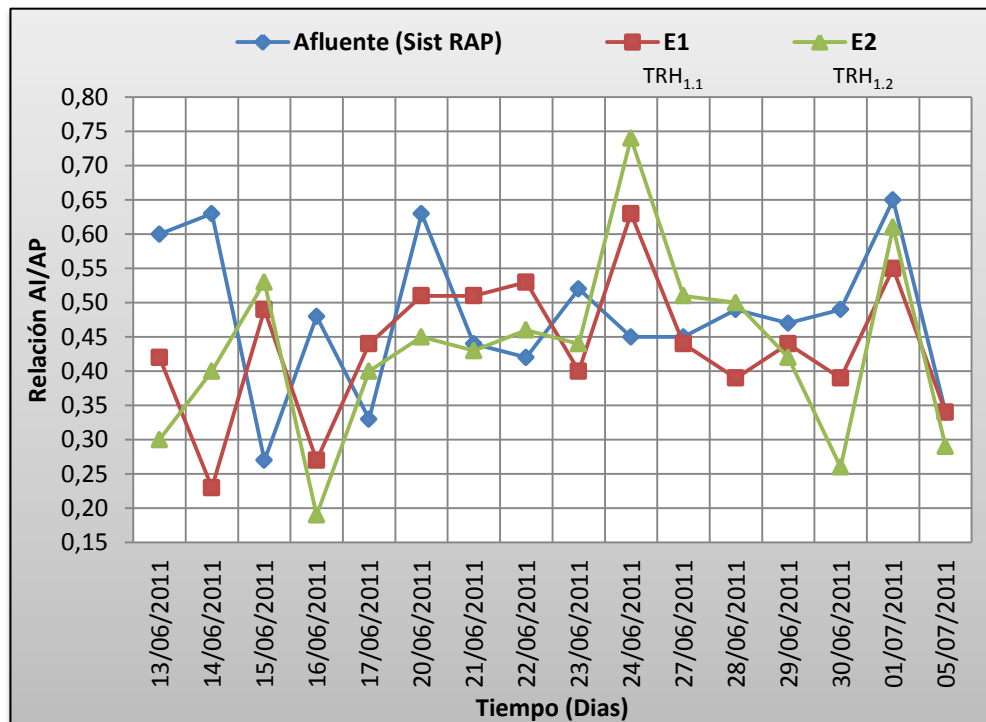


Figura 24. Relación AI/AP en el sistema – fase de arranque

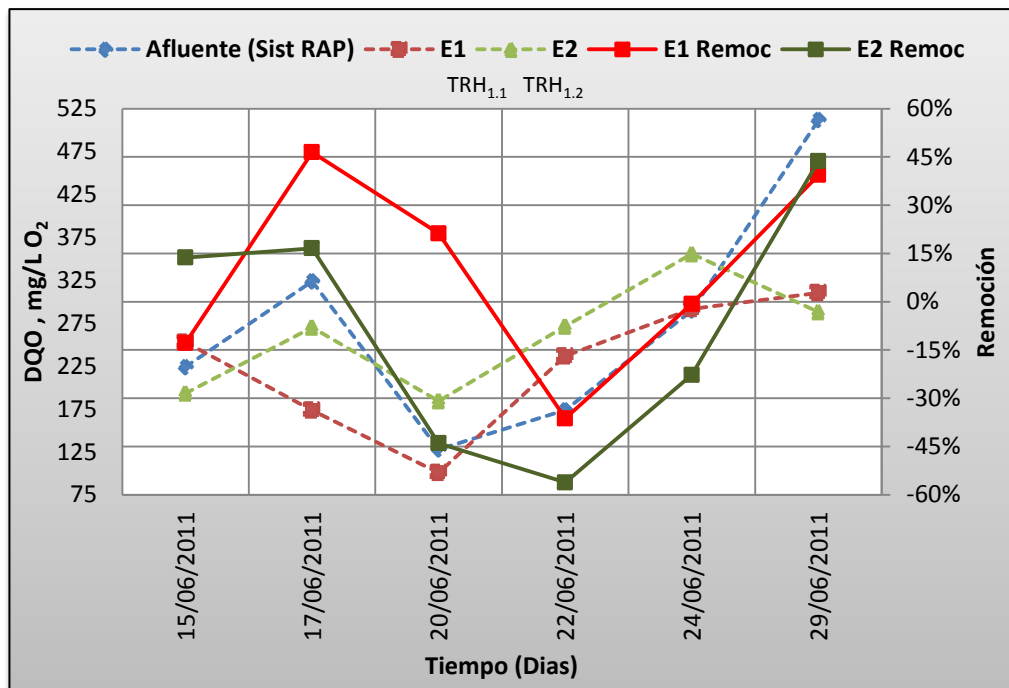


5.3.1.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO) – fase de arranque

Como medida para valorar el proceder de los reactores UASB, de acuerdo con las concentraciones y eficiencias que en la operación se estaban conjugando, en la Figura 25 se fijan los términos obtenidos inicialmente al seguir el proceso de adaptación a la circunstancia hidrodinámica ascendente.

El afluente en gran parte de esta etapa fue bajo y voluble, [128 – 323.84] mg/L O₂, y solo advirtió su repunte con la última carga orgánica registrada, hecho que explica los [100.80 – 310.40] mg/L O₂ en E1 y [184.32 – 355.84] mg/L O₂ en E2 como los rangos donde se movieron las descargas del sistema. De ahí que estos dos tras un inicio sorprendente y bajo, -12.86 a 46.44% en E1 y 13.71 a 16.60% en E2, después se “desplomaran” hasta -36.28 y -56.17% pero pasados los días sus diferencias con respecto a la entrada (Sist RAP, 512 mg/L O₂) ayudaron para que los términos fueran del 39.38 y 43.75%.

Figura 25. DQO y su remoción en el sistema – fase de arranque



5.3.1.3 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) – fase de arranque

En un par de evaluaciones iniciales y/o “parciales” con el fin de indagar el estado que ofrecía el sistema, en relación a la DBO₅, la Figura 26 expone referencias del monitoreo.

Los índices de entrada durante una misma semana fueron bajos, 77 y 102 mg /L O₂, y las salidas consecuentes con tales cifras fueron menores. Lo cual derivó en rendimientos del 19.40% para ambos efluentes, que posteriormente se redujeron y manejaron una estrecha diferencia al ubicarse en 13.82% para E1 y 12.23% para E2.

Figura 26. DBO₅ y su remoción en el sistema – fase de arranque

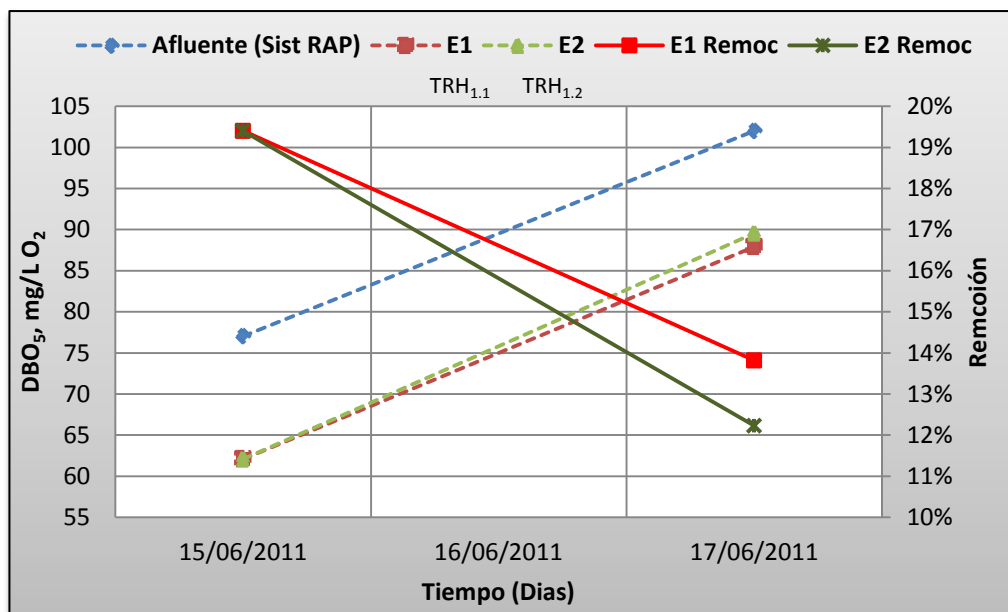


Tabla 15. Promedio de los parámetros monitoreados – fase de arranque

Parámetro	TRH _{1.1} y TRH _{1.2} (junio 13 a julio 5)		
	Afluente	Efluente 1	Efluente 2
Unidades de pH	7.32	7.45	7.46
Alcalinidad Parcial (mg/L CaCO ₃)	336.81	363.06	360.06
Alcalinidad Intermedia (mg/L CaCO ₃)	159.75	153.94	153.06
Índice AI/AP	0.48	0.44	0.43
DQO (mg/L O ₂)	275.25	227.68	260.48
DQO removida (%)	-	10	-8
DBO ₅ (mg/L O ₂)	89.54	75.02	75.83
DBO removida (%)	-	16.61	15.81

5.3.2 Fase 2. Operación continua estable

Los resultados presentados a continuación son producto del “equilibrio” activo logrado después de exponer los reactores UASB a un ritmo de trabajo sin pausa (Fase 1) y superar algunas fallas (Julio 6 al 13). El periodo por el cual se juzgó el desempeño de ambas unidades fue sometido a cambios progresivos, como se exponen en la Tabla 16, y alimentado por el afluente de la PTAR UPB (Sist PTAR) al haber superado la etapa preliminar de tratamiento como medida operativa pues este sustrato posee una carga orgánica mayor.

Tabla 16. Condiciones operacionales para los reactores UASB durante la “preservación” del flujo estable.

FECHA	Reactor UASB No.1		Reactor UASB No.2		
	Flujo (m ³ /h)	TRH teórico	Flujo (m ³ /h)	TRH teórico	
14/07/2011 21/07/2011	0.0066	17:09:16.20	0.0066	17:29:54.00	TRH _{2.1} TRH _{2.2}
22/07/2011 29/07/2011	0.0090	12:34:48.00	0.0090	12:49:55.20	TRH _{3.1} TRH _{3.2}
01/08/2011 10/08/2011	0.0108	10:28:58.80	0.0108	10:41:36.00	TRH _{4.1} TRH _{4.2}
11/08/2011 23/08/2011	0.0120	9:26:06.00	0.0120	9:37:26.40	TRH _{5.1} TRH _{5.2}
24/08/2011 05/09/2011	<i>Receso en las operaciones</i>				
06/09/2011 17/09/2011	0.0132	8:34:38.40	0.0132	8:44:57.00	TRH _{6.1} TRH _{6.2}

5.3.2.1 pH y Alcalinidad (Relación Al/AP) – fase continua estable

Los dos parámetros citados en el encabezado y sus conductas extendidas por múltiples TRH (julio 14 a agosto 23 y septiembre 5 al 17) en el sistema son revelados en las Figuras 27 y 28, dejando así expuestas las particularidades que rodearon la operación monitoreada.

Durante las segundas condiciones hidráulicas aplicadas (TRH₂) los registros señalaron que el cambio “para bien” en la alimentación del sistema (Sist RAP por Sist PTAR), tras reasumir operaciones, hizo frente a los trastornos sucedidos dentro de los reactores. Los pH afluentes fluctuaron entre [7.90 – 8.70] mientras que los efluentes estuvieron entre [7.00 – 7.60]. Aun así la relación Al/AP no era la ideal, siendo la de julio 15 la situación más crítica pues la proporción era de 0.97 en el sustrato, 1.34 en E1 y 0.92 en E2. Después, sobrevinieron fuertes descensos y ascensos para esta última condición, especialmente en el afluente y E2, llegando a un punto culminante en julio 21 cuando se dio la segunda caída abrupta del pH en la entrada [8.63 - 7.11].

Para las terceras circunstancias (TRH₃), ajustadas en julio 22, el aumento de los rangos de pH en las aguas residuales incorporadas [8.38 – 8.84] y en particular de los efluentes [7.81 - 8.42] E1 y [7.64 - 8.43] E2 fue destacado. Se generalizó además desde el inicio de esta etapa un equilibrio Al/AP en la

operación cercano al máximo aconsejado 0.30, de [0.26 - 0.38] en la entrada, [0.23 - 0.35] en E1 y [0.18 - 0.32] en E2.

En las cuartas situaciones operativas (TRH₄) el afluente se mantuvo predominantemente alto [8.64 – 9.02] a pesar del inesperado declive de Agosto 8 [8.98 – 7.34 – 8.86]. En las salidas el comportamiento se mostró irregular al principio, con ligeros ascensos y descensos entre [8.13 – 8.59], siendo afectadas después por la caída referida durante dos días (agosto 8-10) con rangos entre [7.60 – 7.74]. El indicador AI/AP por su parte continuó las tendencias señaladas al mantenerse “estable”, rangos de [0.24 – 0.29] en el suministro, [0.22 – 0.38] en E1 y [0.18 – 0.34] en E2.

La aplicación de los quintos regímenes (TRH₅) coincidió con reducciones progresivas en el rango de pH del sustrato [8.97 – 8.27] y por consiguiente en las descargas del sistema, [8.21 – 7.64] en E1 y [8.21 – 7.62] en E2. Esa condición “favoreció” de manera notable la relación AI/AP porque llevo a mantener el sistema de tratamiento prevalentemente por debajo del nivel sugerido, con rangos entre [0.17 – 0.35] en E1 y [0.14 – 0.30] en E2.

Los sextos ajustes en la ejecución del tratamiento (TRH₆) a escala laboratorio tuvieron lugar después del receso en las valoraciones habituales entre Agosto 24 y Septiembre 5. El suministro exhibió un pH de irregular conducta y sufrió una caída repentina en Septiembre 14 [8.83 – 7.00 – 8.49], no obstante su rango por lo general fue entre [8.49 – 8.96]. En las salidas, el pH sufrió un paulatino incremento con intervalos de [7.63 – 8.23], mientras que las proporciones AI/AP estuvieron entre [0.21 – 0.30] para E1 y [0.18 – 0.29] para E2.

Figura 27. pH en el sistema – fase continua estable

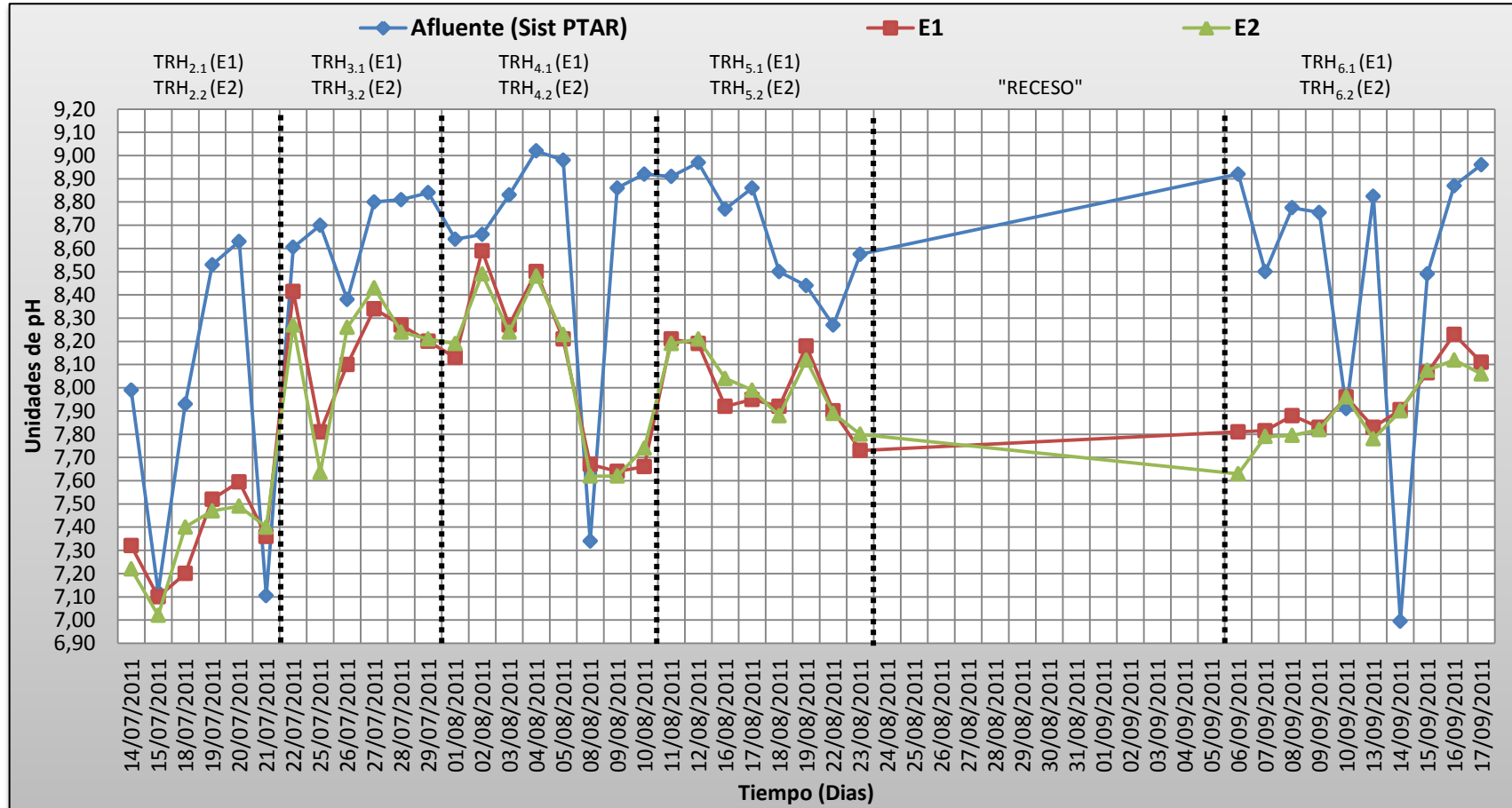
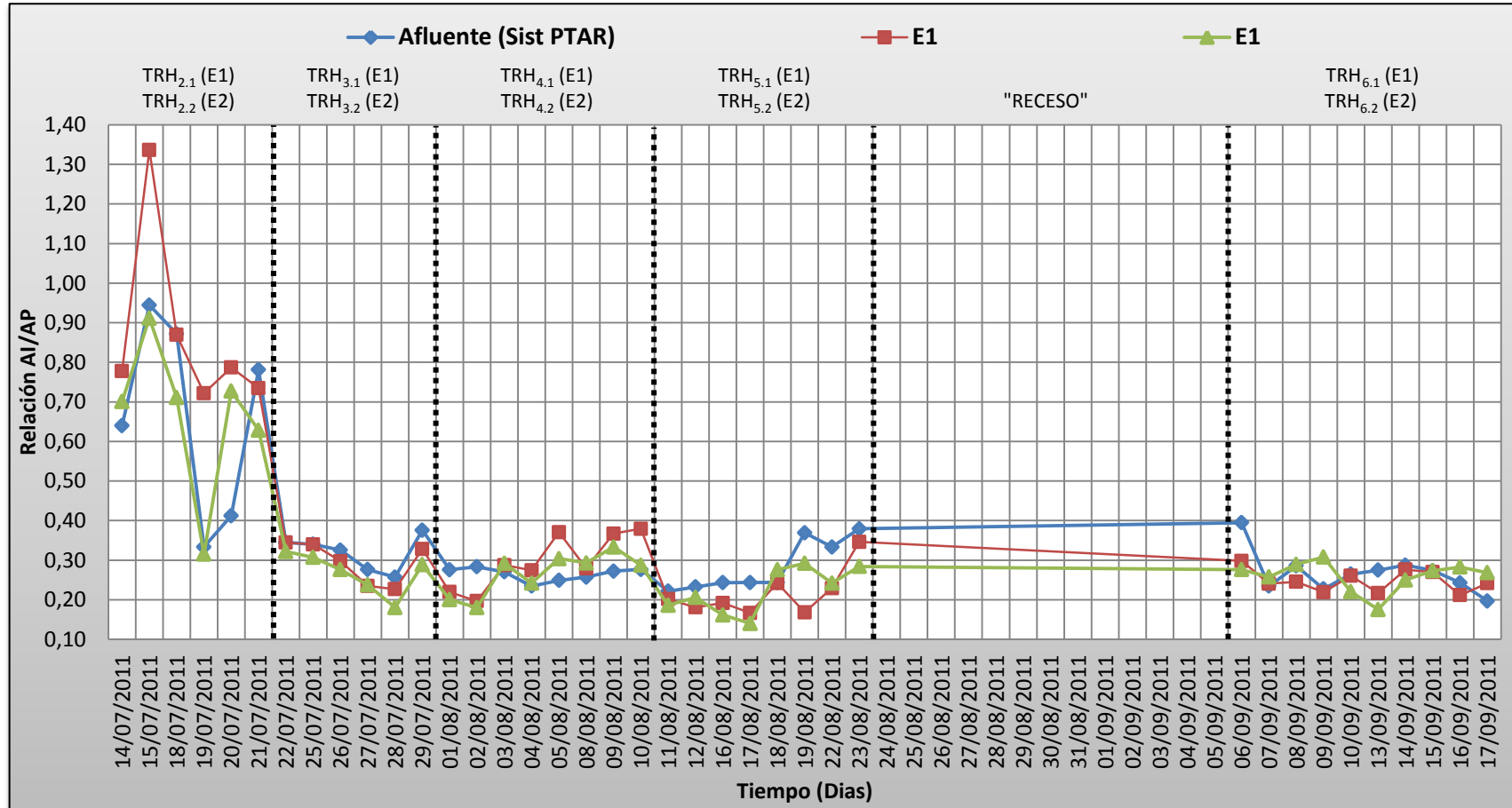


Figura 28. Relación AI/AP en el sistema – fase continua estable

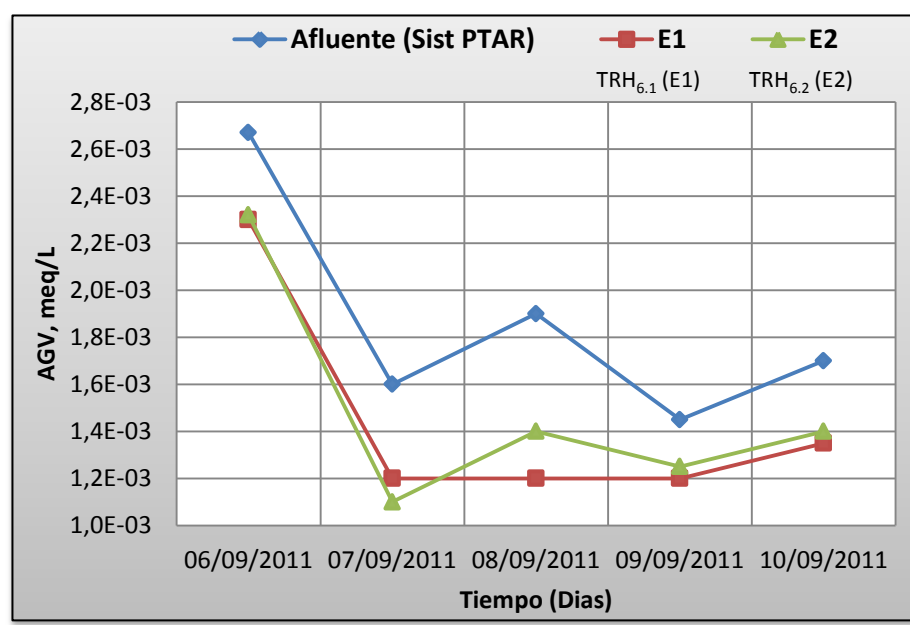


5.3.2.2 Ácidos Grasos Volátiles (AGV) – fase continua estable

La evaluación de los Ácidos Grasos Volátiles a partir de sextos ajustes en la ejecución del tratamiento (TRH₆) fue aplicada con el fin de revelar cambios en las concentraciones durante el proceso digestivo y se registra en la Figura 29.

Enfrentado un segundo receso, entre Agosto 24 y Septiembre 5, valoraciones “exploratorias” permitieron ver al día de retomadas las operaciones simultaneas reducciones en las salidas, desde 0.0023 meq/L, para luego posicionarse de manera “estable” entre [0.0011 – 0.0014] meq/L. Sin duda el directo responsable de lo sucedido en este lapso de TRH fue el suministro, quien con sus pautas exhibidas “promovió” la reducción de los niveles acumulados de AGV y por ende los aceptables índices AI/AP en el resto del sistema (ver Figura 26).

Figura 29. Ácidos Grasos Volátiles en el sistema – fase continua estable



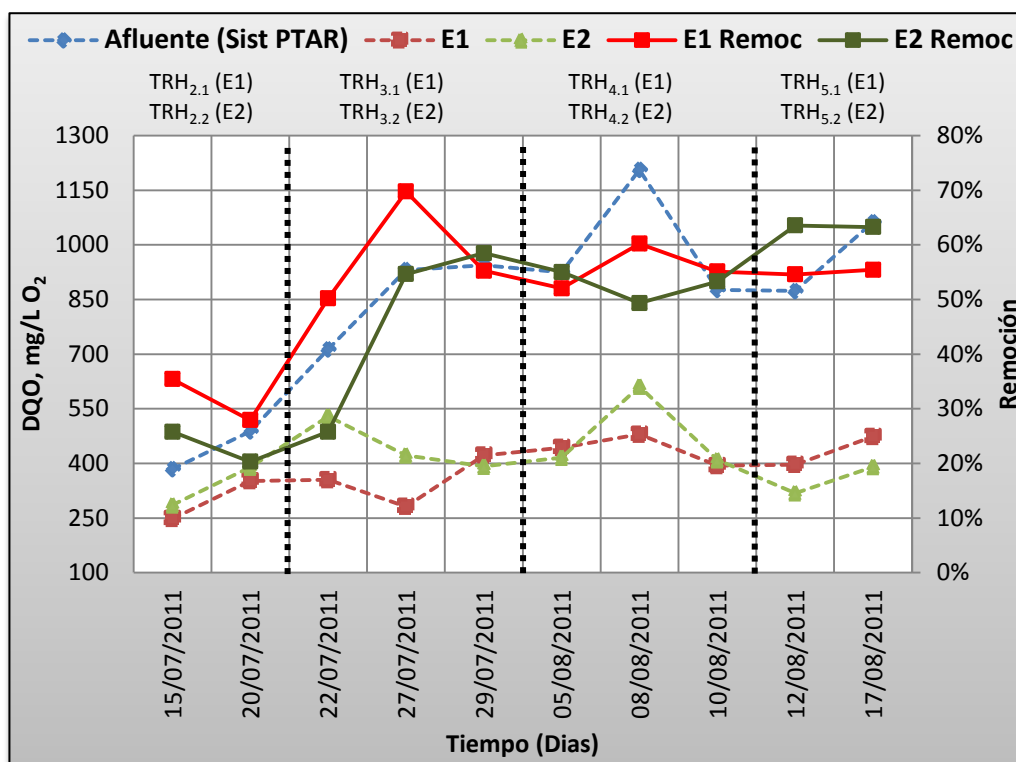
5.3.2.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO) – fase continua estable

Las conductas expuestas al hacer el seguimiento del sistema y valorar rendimientos individuales de cada reactor están en la Figura 30, donde las extendidas ilustraciones notifican los alcances en cada TRH.

Para el caso del afluente, este registro un aumento progresivo de su contenido orgánico desde que se aplicaron en reactores los segundos TRH y mediaron los terceros, [488.32 – 931.20] mg/L O₂, después concibió una pauta general que fluctuó ligeramente sobre los 900 mg/L O₂ y que se difundió hasta las quintas condiciones hidráulicas.

Las conductas expuestas por cada manto de lodo señalan que existió una leve disparidad entre E1 y E2, pues intercalaron sus niveles más bajos en los diversos TRH, cuando redujeron las cargas inmersas en el sustrato. Los rangos para esta fase fueron entonces de [281.70 – 480.00] y [318.00 – 611.20] mg/L O₂ respectivamente, y se necesitó de dos cambios en los regímenes de operación (menores TRH y V_{asc}) para que con el suministro se marcaran diferencias relevantes. Fue así como se llegó a intervalos aceptables en los rendimientos del [52.04 – 69.76] % para E1 y del [49.34 – 63.55] % para E2.

Figura 30. DQO y su remoción en el sistema – fase continua estable



5.3.2.4 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) – Fase continua estable

Los limitados resultados de DBO₅ obtenidos además de los réditos por UASB al operar con regularidad semanal el sistema se revelan en las Figura 31, como magnitudes anexas dentro del proceso anaerobio.

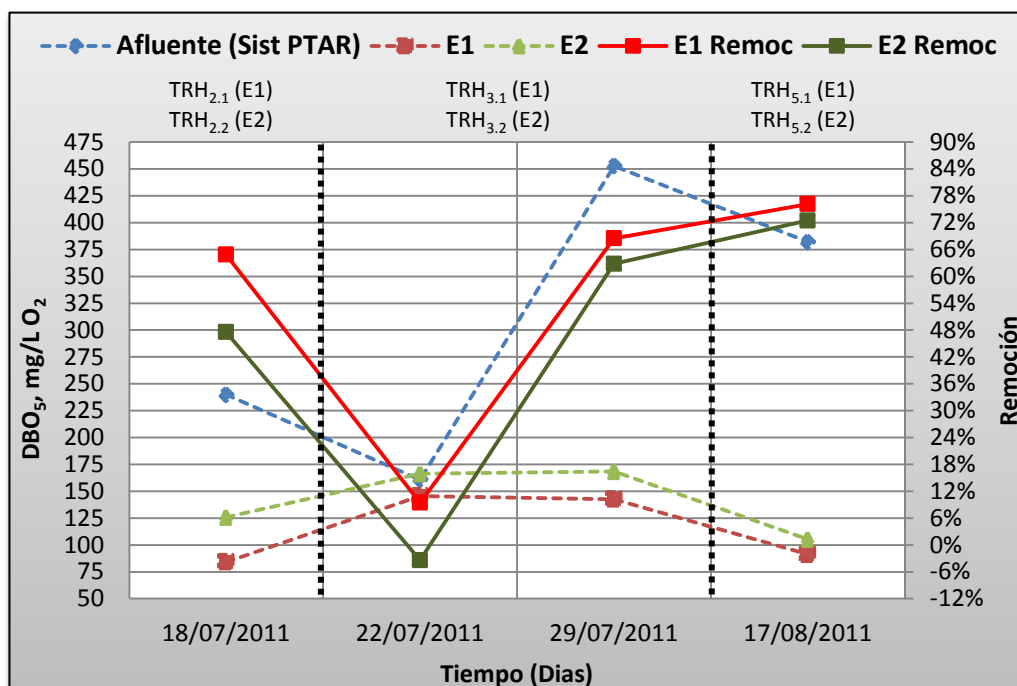
Las cifras para la entrada hacen notables sus registros por las marcadas diferencias, tanto en el primer par como en el segundo, de 239.810 y 160.798 mg/L O₂ como de 452.775 y 382.065 mg/L O₂ tras el inicio del segundo semestre académico.

Para cada reactor sus términos generales derivaron en pautas “sincronizadas” de DBO₅, donde la reducción en el nivel de descarga favoreció ligeramente a E1 con respecto a E2, rangos de [84.25 – 145.632] mg/L O₂ y [105.16 – 168.295] mg/L O₂ respectivamente en los TRH suscritos (segundos, terceros y quintos). Los rendimientos por su parte en E1 fueron de medio-alto a alto,

[64.87 – 76.15] %, mientras que para E2 se movieron de medio a medio-alto, 47.54% y de 62.83 ascendiendo la decena en porcentaje.

Como hecho puntual relevante esta la caída de DBO_5 en el suministro, justo cuando se impartían en julio 22 los TRH₃, que llevo a este a un nivel semejante al de los efluentes lo que genero rendimientos nada favorables de 9.43% en E1 y de -3.42% en E2.

Figura 31. DBO_5 y su remoción en el sistema – fase continua estable



5.3.2.5 Sólidos – fase continua estable

El material orgánico presente en el sistema, de acuerdo con la relación Solidos Totales Volátiles y Solidos Totales (STV/ST), además de los pormenores del material suspendido y disuelto removido en cada reactor son reseñados de manera individual en las Figuras 32 y 33.

En la entrada las variables proporciones STV/ST fueron de [0.55 – 0.65] y expreso a 0.46 como la excepción a través de todos los TRH, lo que llevo a instalar su conducta por encima de los demás registros del sistema.

Para E1 las relaciones STV/ST rondaron generalmente al 0.42 y presento a 0.53 como su máxima relación, lo cual indica que había una importante presencia de material orgánico a estabilizar. Sus remociones en cuanto a ST fueron “impactadas” de manera sustancial por el alto registro en DQO de agosto 8, 1206.4 mg/L, que entre indicadores del 45 y 50% llevo todo por un lapso hasta el 9%. En contraste los STV marcaron diferencia con respecto a sus predecesores, al expresar resultados que rondaron el 65 y 45% durante la operación.

En el caso de E2 este concibió índices de STV/ST que fluctuaron sobre 0.40 y fue de 0.45 el ligero término por fuera de la línea. Su nivel depurador en cuanto a ST se vio también afectado por los hechos de agosto 8, pues del 34 cayó al -22%, de cualquier forma pasados los días este se posiciono en términos que rondaron el 48%. En los STV su proceder fue afín al de los ST, cayó desde el 49% para estar en 1% pero luego se elevó considerablemente al 53 y 66%.

Figura 32. Comportamiento de los sólidos en E1 – fase continua estable

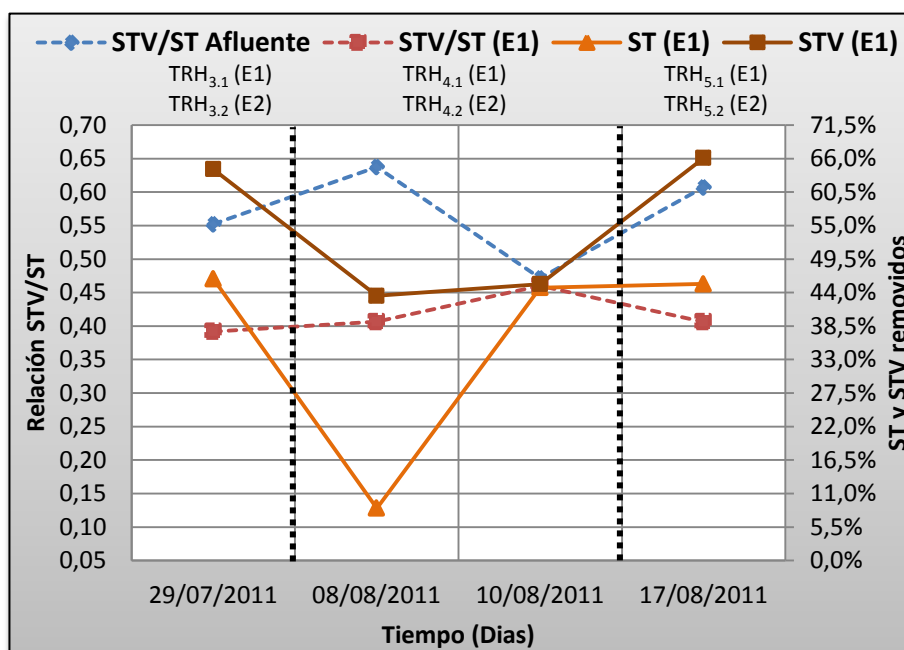
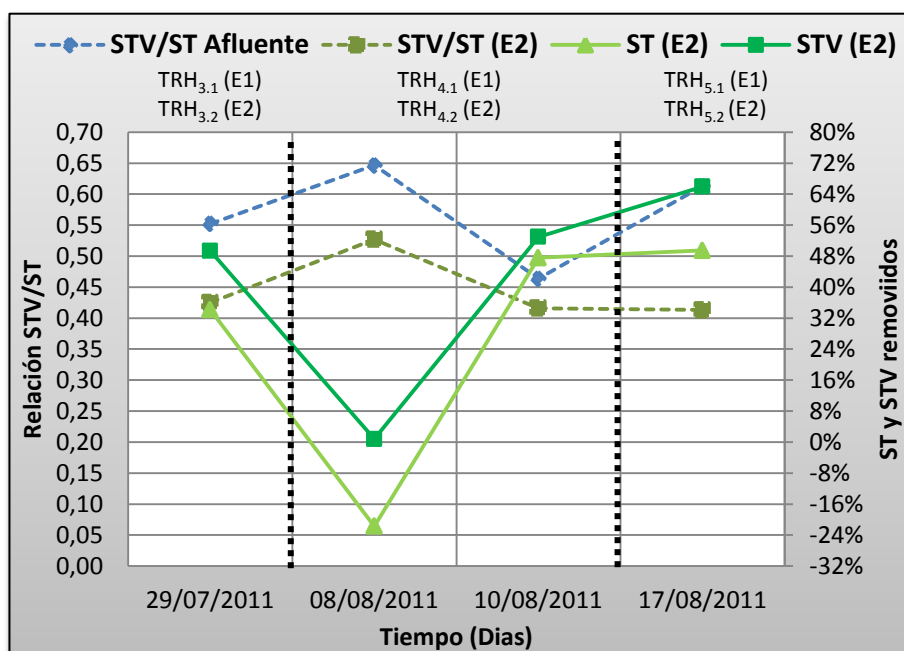


Figura 33. Comportamiento de los sólidos en E2 – fase continua estable



5.3.2.6 Fosforo – fase continua estable

El comportamiento y rendimiento del sistema es advertido en la Figura 34, donde se agrupan los índices desde julio 18 hasta agosto 19 (TRH₂ – TRH₅), y se señala la “sincronía” e irregularidades obtenidas de un parámetro que puede considerarse auxiliar al ser evaluado. Las referencias en relación a este dicen que su reducción se consigue al acompañarse de un etapa aerobia ya que estos suplen por tal vía sus requerimientos biológicos, debido a que los primeros terminan liberando fosforo almacenado al responder a los AGV³⁴.

Para el suministro su registro inicial de Fosforo Total fue bajo, 9.58 mg/L, y después conservo una estabilidad entre [39.50 – 31.56] mg/L finalizando los TRH₂ hasta la etapa temprana de los TRH₄ en reactores. El día 5 de agosto, bajo ese último régimen hidráulico, su conducta se tornó atípica debido al aumento advertido, 58.50 mg/L, y los subsecuentes registros de 26.50 y 50.00 mg/L. En TRH₅ se “extendió” ese último registro que por siete días (agosto 10 – 17) no genero grandes diferencias, aunque para agosto 19 la valoración fue de 36.00 mg/L.

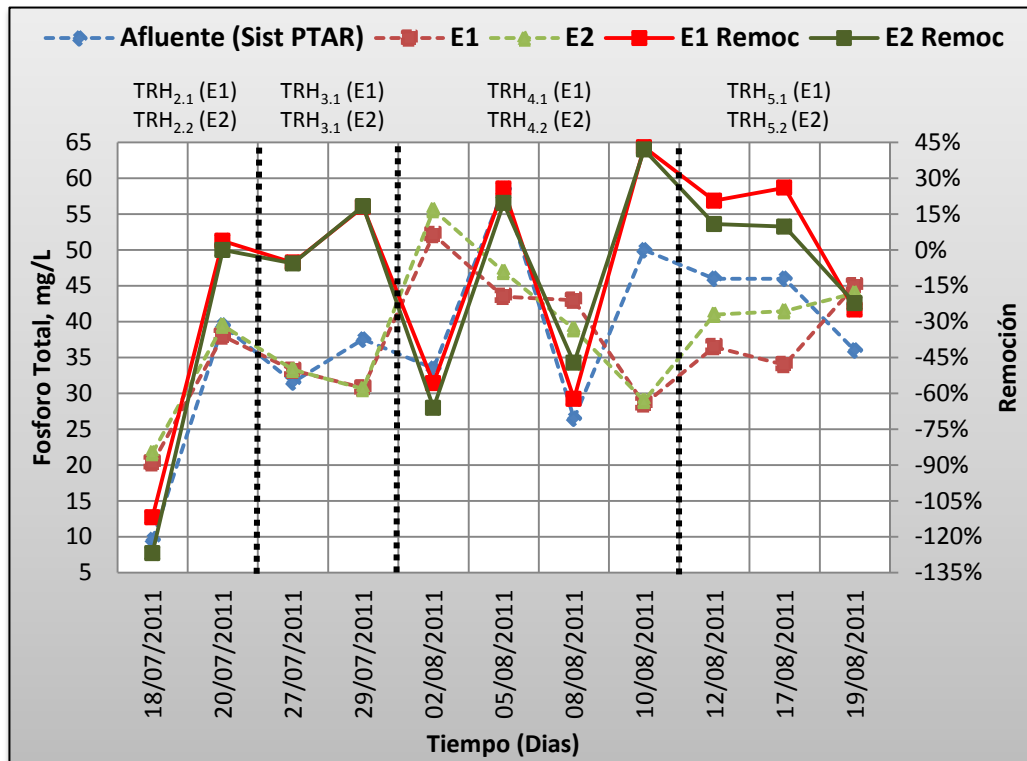
En lo concerniente al proceder del par reactores UASB, durante sus TRH₂ y TRH₃, los resultados señalaron que al relacionar las mínimas diferencias con respecto a la entrada el rendimiento Individual era ampliamente desfavorable. Las pautas iniciales en efluentes a junio 18 fueron de -111.81% en E1 y -126.82% en E2, después vino un “positivo” retroceso que situó el tratamiento en casi nulas diferencias con respecto a la entrada. Programado cada TRH₃ los vertimientos se ubicaron en valores negativos pero sin superar la decena, luego sobrevino un ascenso general que ubico en 18% el alcance ejercido hasta ese momento por las unidades.

Las actividades operadas bajo los TRH₄ registraron imprevistas alzas y sucesivos descensos, entre [52.145 – 28.500] mg/L para E1 y [55.608 – 29.00] mg/L para E2, que en nada favorecieron el rendimiento individual pues resultaron situando un par de oportunidades sus indicadores por encima del inestable afluente. De ahí entonces que los negativos y aceptables índices de remoción en E1 y E2 resultaran intercalándose, agosto 2 y 8 con -60.85 y -54.71% mientras que en agosto 5 y 10 fueron del 22.65 y 42.50% respectivamente, todos como puntos medios.

Durante los TRH₅ la conducta de cada efluente volvió a incrementarse, con un rango de [36.50 – 45] mg/L para E1 el cual estuvo generalmente por debajo de E2 que se ubicó entre [41 – 44] mg/L. Estos hechos de acuerdo con la pauta expuesta por el suministro contribuyeron en la caída parcial y violenta del rendimiento, al situarse en índices cercanos al 20% en E1 y ajustarse al 10% en E2 que después se aproximaron al -20% para ambos.

³⁴ CRITES & TCHOBANOGLAUS, Op cit., pag.395.

Figura 34. Fosforo y su remoción en el sistema – fase continua estable



5.3.2.7 Nitrógeno – fase continua estable

El comportamiento y reducción del Nitrógeno Total inmerso en el agua residual que abasteció el sistema a escala laboratorio es presentado en la Figura 35, parámetro que es considerado relativamente auxiliar al valorarse en tratamientos anaerobios.

Los limitados registros NTK señalan de manera contundente que E1 ofrece mejores garantías con respecto a E2, al no exponer en la serie un sesgo del 50% por errores procedimentales. La entrada revelo índices de [208.32-135.00] y 299 mg/L, que en E1 representaron utilidades entre el 20 y -9.63% hasta concluir en 54.78%.

Por su parte E2 con su inusual conducta no es fiable principalmente durante los TRH que incluyen a julio 29 y agosto 12, pues no se ajustan a lo visto en su referente más cercano.

Figura 35. Nitrógeno y su remoción en el sistema – fase continua estable

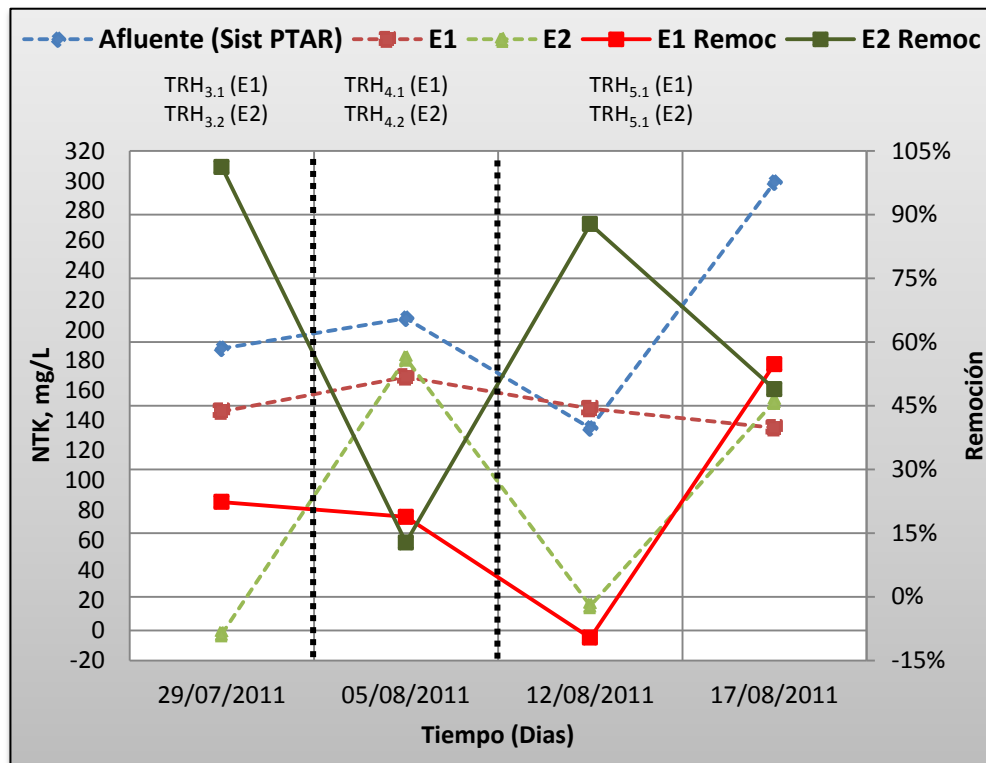


Tabla 17. Promedio de los parámetros evaluados con mayor regularidad - fase continua estable

Parámetro	TRH _{2,1} y TRH _{2,2} (julio 14-21)			TRH _{3,1} y TRH _{3,2} (julio 22-29)			TRH _{4,1} y TRH _{4,2} (agosto 1-10)			TRH _{5,1} y TRH _{5,2} (agosto 11-23)			TRH _{6,1} y TRH _{6,2} (sept 6-17)		
	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2
pH	7.88	7.35	7.33	8.69	8.19	8.17	8.66	8.08	8.08	8.66	8.00	8.02	8.50	7.94	7.89
Alcalinidad Parcial AP (mg/L CaCO ₃)	275.83	205.00	227.00	338.17	442.00	455.67	416.13	477.50	494.75	349.38	529.38	516.00	507.60	586.00	569.70
Alcalinidad Intermedia AI (mg/L CaCO ₃)	136.83	167.83	138.67	109.00	129.17	121.83	109.75	136.38	128.75	95.63	111.88	115.13	133.40	144.50	148.20
Índice AI/AP	0.66	0.87	0.67	0.32	0.30	0.27	0.26	0.30	0.27	0.28	0.22	0.22	0.27	0.25	0.26
DQO (mg/L O ₂)	436.48	300.16	337.28	862.93	353.07	448.00	1002.67	439.04	478.93	968.00	435.20	354.40			
DQO removida (%)		31.68	23.05		58.41	46.30		55.79	52.55		55.00	63.40			
Fosforo Total (mg/L)	25.54	29.14	30.61	34.554	31.99	31.993	42.12	41.79	42.652	42.667	38.50	42.17			
Fosforo removido (%)		-54.01	-63.41		6.40	6.38		-12.32	-12.88		7.25	-0.52			

Tabla 18. Promedio de los parámetros evaluados con menor regularidad - fase continua estable

Parámetro	TRH _{2,1} y TRH _{2,2} (julio 14-21)			TRH _{3,1} y TRH _{3,2} (julio 22-29)			TRH _{4,1} y TRH _{4,2} (agosto 1-10)			TRH _{5,1} y TRH _{5,2} (agosto 11-23)			TRH _{6,1} y TRH _{6,2} (sept 6-17)		
	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2	Afl	E1	E2
AGV (meq/L)													1.86E-3	1.45E-3	1.49E-3
DBO ₅ (mg/L O ₂)	239.81*	84.25*	125.80*	306.79**	144.14**	167.29**				382.07	91.13	105.16			
DBO ₅ removida (%)	-	64.87	47.54	-	38.96	29.71				-	76.15	72.48			
ST (mg/L)				1336.00*	718.00*	880.00*	974.00**	681.00**	785.00**	1524.00*	832.00*	770.00*			
ST removidos (%)				-	46.00	34.00	-	26.70	12.93	-	45.41	49.48			
STV (mg/L)				738.00*	270.00*	374.00*	524.00**	286.00**	380.00**	934.00*	326.00*	318.00*			
STV removidos (%)				-	63.00	43.00	-	45.40	26.88	-	65.10	65.95			
Relación STV/ST				55.246	37.604	42.50	55.51	42.18	47.14	61.29	39.18	41.23			
NTK (mg/L)***				188.16*	146.16*	-2.24*	208.32*	169.12*	181.12*	217.00**	141.60**	84.65**			
N removido (%)				-	22.32	101.19	-	18.82	12.77	-	22.58	68.34			

*Solo un registro (AGV, Julio 18 y Agosto 18; ST y STV, Julio 29 y Agosto 17; Nitrógeno, Julio 29 y Agosto 5)

**Dos registros

***Acoger resultados del reactor UASB1 por generar mayor confiabilidad

5.3.3 Fase 3. Operación continua (E1) y operación discontinua (E2)

Las condiciones impuestas para la tercera fase corresponden al interés de ejecutar cada parte del sistema en distintas programaciones. El reactor UASB1 (E1) se mantuvo entonces con un flujo incesante de entrada mientras que el reactor UASB2 (E2) fue sometido a la intermitencia, ambos alimentados por el afluente PTAR UPB (Sist PTAR) y experimentando cambios en los TRH como se indica en la Tabla 19.

Tabla 19. Condiciones operacionales reactores UASB durante programaciones continuas y discontinuas

FECHA	Reactor UASB No.1		Reactor UASB No.2	
	Flujo (m ³ /h)	TRH _(6.1 y 8) teórico	Flujo (m ³ /h)	TRH _(7 y 9) teórico
20/09/2011 24/09/2011	0.0132	8:34:38.40	0.0258*	4:28:34.80
26/09/2011 01/10/2011	0.0144	7:51:46.80	0.0276*	4:11:36.00

*Dos bombas peristálticas conectadas a temporizador.

5.3.3.1 pH y Alcalinidad (Relación Al/AP) – fase continua (E1) y discontinua (E2)

De acuerdo con los parámetros en mención la transcripción hecha de sus registros se observa en las Figuras 36 y 37, donde cada parte del sistema reseña cual fue su conducta en esta fase hidrodinámica de cambios operacionales.

En el caso del sustrato, su primer parámetro inicio marcando índices del 8.46 pero a septiembre 22 este experimento una caída la cual se extendió por 3 días, a términos cercanos al 7.60 y de 8.04, que además “desequilibraron” la Al/AP al llevarla a aumentos progresivos entre [0.33 – 0.41]. Sin embargo desde septiembre 27 el pH volvió a extender una alta regularidad, intervalo de [8.58 – 8.85], que conllevo a posicionar al segundo parámetro estrechamente por debajo de 0.30 y descender un tanto más.

Para E1, que represento el reactor con sucesivo flujo, su actividad extendida de TRH_{6.1} se definió por el descenso en septiembre 22 del suministro. Así pues, su primer indicador se movió por cifras de 7.80 hasta 7.38 mientras que la proporción Al/AP siguió con los términos ya registrados en septiembre al ubicarse ligeramente por debajo del límite sugerido, con mínimo de 0.19 y máximo de 0.29.

Fijado TRH₈, el pH siguió un escalonado ascenso, [7.67 – 8.30], pero tras una súbita inflexión (septiembre 28 a 29) par de sus registros descendieron a 7.73. Esa última descolgada pudo haber influido para que después de 5 días de regularidad en los registros Al/AP, [0.25 – 0.29] (sept 22-28), esta ampliara su

positiva diferencia con respecto al punto inicial de estrés en la digestión al ofrecer índices de 0.18, 0.20 y 0.25 finalizando la situación operativa.

Figura 36. Comportamiento del pH – fase continua (E1) y discontinua (E2)

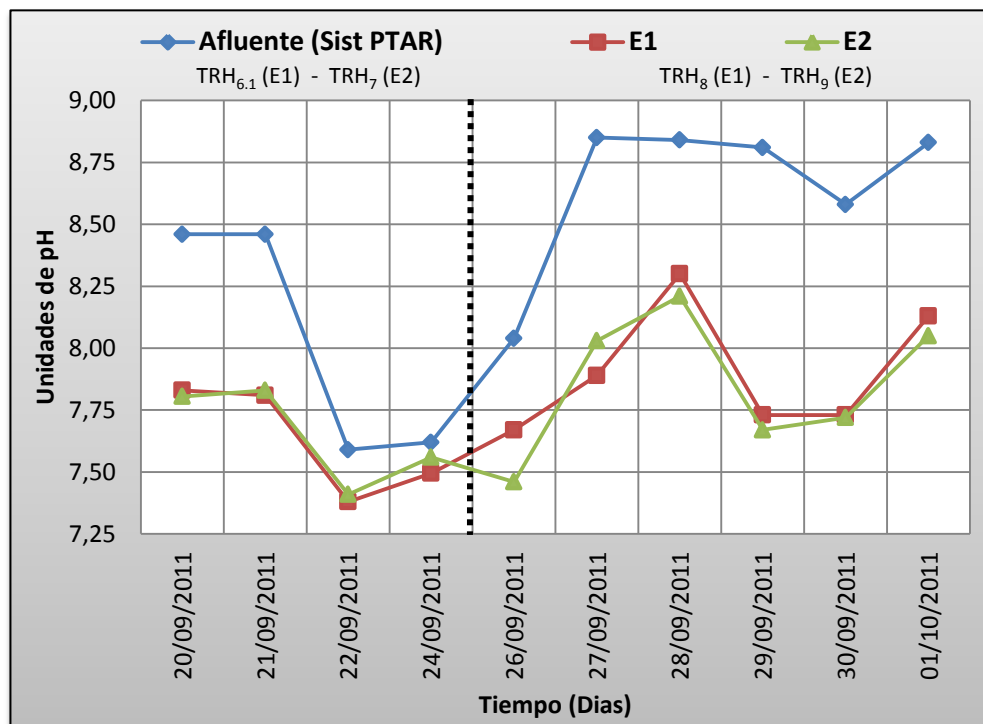
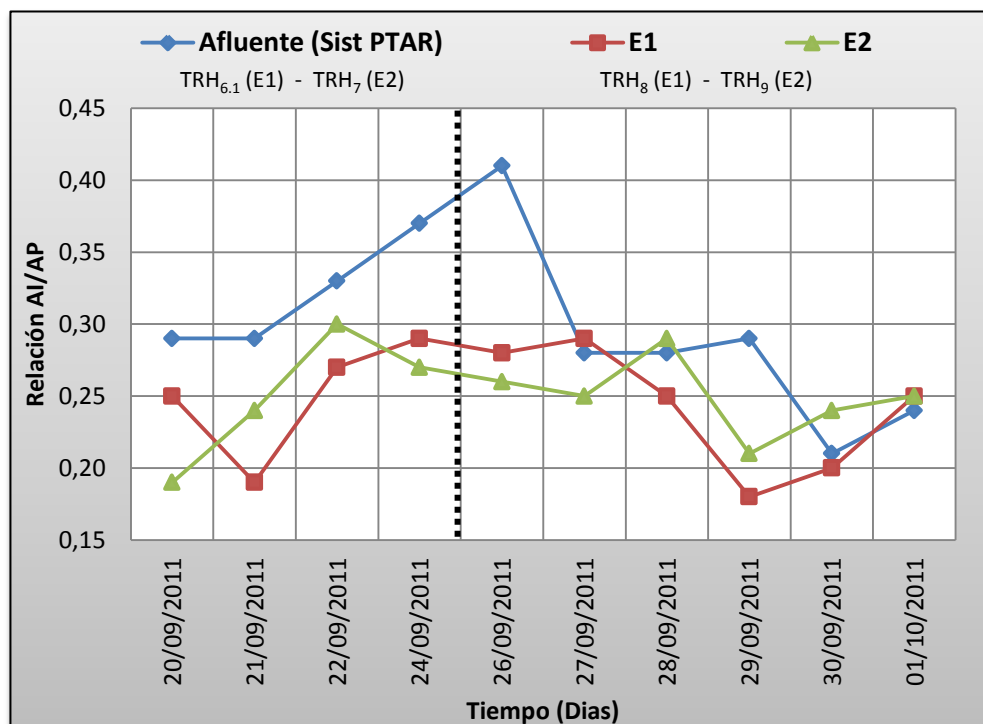


Figura 37. Relación AI/AP – fase continúa (E1) y discontinua (E2)



Con E2, que apoyo su discontinuidad en el régimen de suministro por medio de un temporizador, los términos de su pH en TRH₇ fueron irregulares y muy parecidos a los de su directa “competencia”, al estar levemente por encima de 7.80 y caer para rondar el 7.50. La diferencia para esta programación la marco la AI/AP al registrar un progresivo incremento, que en conjunto cubrió un intervalo de [0.19 – 0.30].

Sometido a TRH₉ la primera variable tras tres días de operación ascendido de 7.46 a 8.21, entretanto las proporciones de la digestión por alcalinidades continuaron la regularidad al encontrarse entre 0.25 y 0.29. Hasta que sobrevino la ya referida inflexión o punto de quiebre para el pH, generando par lecturas próximas a 7.70 y final de 8.05, que también distanciaron aunque sutilmente la AI/AP de su máximo con un intervalo de [0.21 – 0.25].

5.3.3.2 Ácidos Grasos Volátiles (AGV) – fase continua (E1) y discontinua (E2)

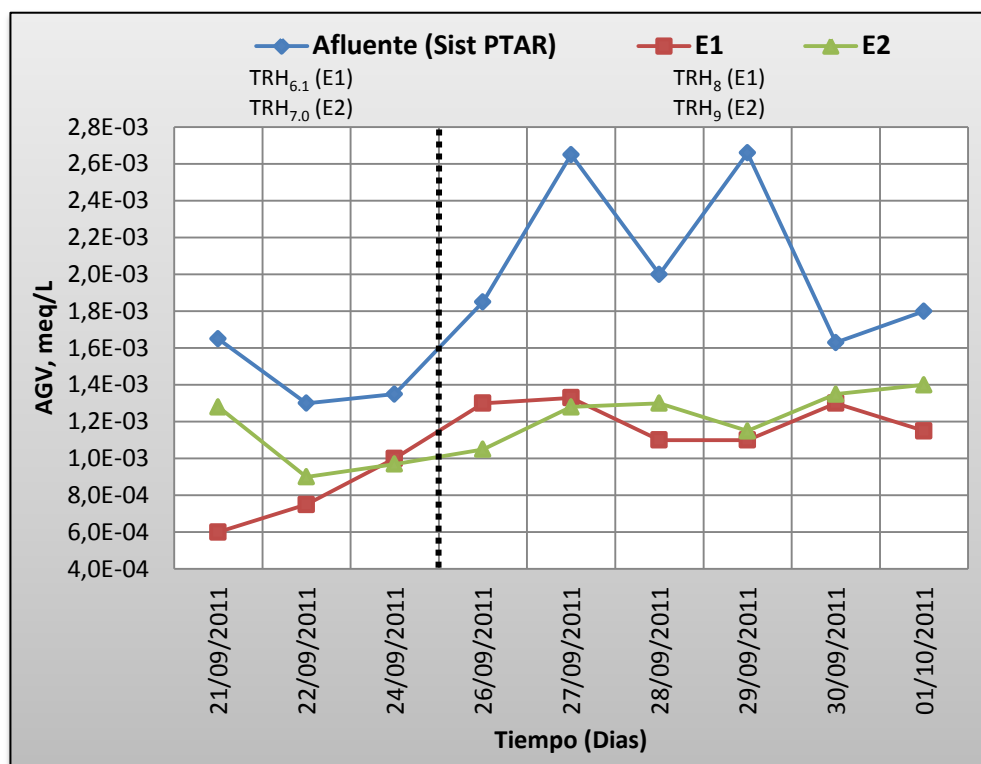
Los términos logrados en torno al parámetro titular durante esta tercera fase son registrados en la Figura 38, suscribiendo así una serie de valoraciones que pueden explicar en buena medida la razón de hechos adyacentes dentro del sistema.

En el caso del afluente, su valoración inicial se redujo levemente desde 0.00165 meq/L y se mantuvo cercana a los 0.00130 meq/L. Para la segunda semana una notable alza llevo par valoraciones a cifras de 0.0026 y a un intermedio 0.0020 meq/L, sin embargo finalizando esta surgieron índices menores tras una caída lógica.

E1 por su parte durante TRH_{6.1} genero registros que no se habían experimentado antes y que fueron en ascenso, [0.0006 – 0.0010] meq/L. Ajustado TRH₈ el proceder del reactor manifestó sutiles variaciones, entre [0.00133 – 0.00110] meq/L, que dejaron ver su regreso a los habituales indicadores conseguidos de septiembre 7 al 10.

E2, bajo el flujo intermitente de TRH₇, registro una ligera reducción desde 0.00128 a valores próximos a 0.0009 meq/L. En TRH₉ los resultados indicaron un mínimo incremento del parámetro hasta lograr una relativa continuidad, con un rango entre [0.00115 – 0.00140] meq/L, como también se logró en los registros de septiembre 7 al 10.

Figura 38. Ácidos Grasos Volátiles – fase continua (E1) y discontinua (E2).



5.3.3.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO) – fase continua (E1) y discontinua (E2)

Los resultados referentes al comportamiento del sistema y al éxito en la depuración, ejercida por los reactores dispuestos en tercera fase son expresados en la Figuras 39.

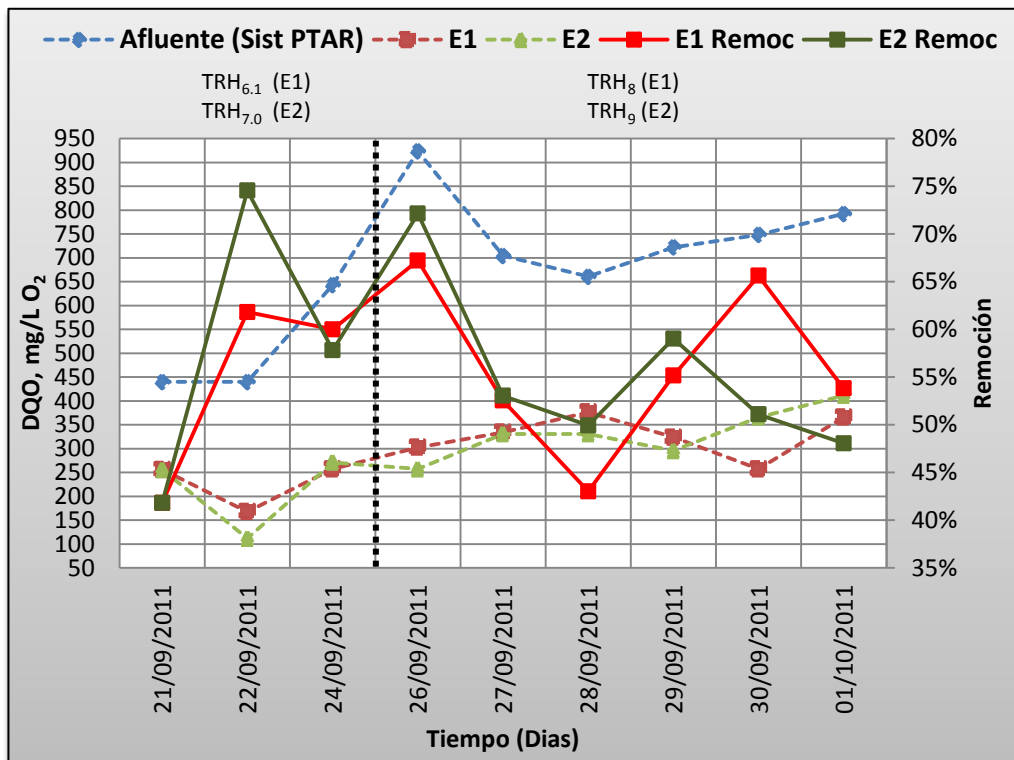
En el caso del afluente sus dos primeros índices registraron 440 mg/L O₂, sin embargo posicionado en una nueva semana se mostró irregular tras ascender hasta 923.543 mg/L O₂ y manejarse entre [660.772 – 792.157] mg/L O₂.

E1 bajo el flujo constante extendido de TRH_{6.1} suscribió un mínimo de 168 mg/L O₂ e indicadores que rondaron los 257 mg/L O₂ como máximo, producto del nivel a la fecha en el sustrato, en todo caso su rendimiento fue de 41.82% (medio) a valores del cercanos al 60% (medio-alto). En condiciones de TRH₈ la serie muestreada señaló una relativa estabilidad con un intervalo de [257.301 – 376.425] mg/L O₂, pero que en cuestión de positivos resultados fue irregular al ascender y descender dos veces, 67.21 y 65.62% (medio-alto) y 43.03 y 53.81% (medio), “irrumpiendo” así lo alcanzado en la segunda fase.

Para el intermitente E2 su TRH₇ señaló valoraciones que no difirieron en mucho con la pauta de su “competencia”, con un mínimo de 112 mg/L O₂, pero que en la transcripción de sus utilidades fluctuó relevantemente al ser de 41.82% (medio), 74.85 y 57.82% (medio-alto). Entre septiembre 26 y 29, pleno TRH₉, la serie consecutiva generó un rango de acción de [257.301 – 295.841]

mg/L O₂ que después de dos días se ubicó en 411.461 mg/L O₂, hecho que en conjunto con los otros de esa última condición hidráulica desato la incontenible reducción del potencial desde 72.14% a valores que rondaron irregularmente el 50% de eficiencia.

Figura 39. DQO y su remoción en el sistema – fase continua (E1) y discontinua (E2).



5.3.3.4 Sólidos – fase continua (E1) y discontinua (E2)

La relación STV/ST y la reducción del material contenido en el suministro para cada partícipe del sistema son presentados en las Figuras 40 y 41, donde el par manto de lodos exponen de manera “directa” el progreso de sus pautas de retención.

El afluente genero proporciones iniciales de STV/ST que rondaron ligeramente a 0.55, sin embargo estas después ascendieron gradualmente de [0.41 – 0.54].

E1 expreso en la semana del 26 de septiembre una pauta STV/ST que respondió conforme al incremento general de la entrada, intervalo de [0.19 – 0.46], donde la diferencia entre las partes solo llego a estrecharse al final. Al caracterizar individualmente tales parámetros, la remoción de ST resulto por lo general moviéndose del 21 y 33%, regulares términos, con un mínimo del 10.18% y máximo fue del 42.34%. Los STV por su parte fueron cayendo a lo largo de la semana, intervalo del [76.60 – 44.40] %, logrando repuntar en el quinto indicador con un 68.45% pero volvieron a decaer racionalmente en el último día de operación a 34.45%.

Figura 40. Comportamiento de los sólidos en E1 – en continuidad

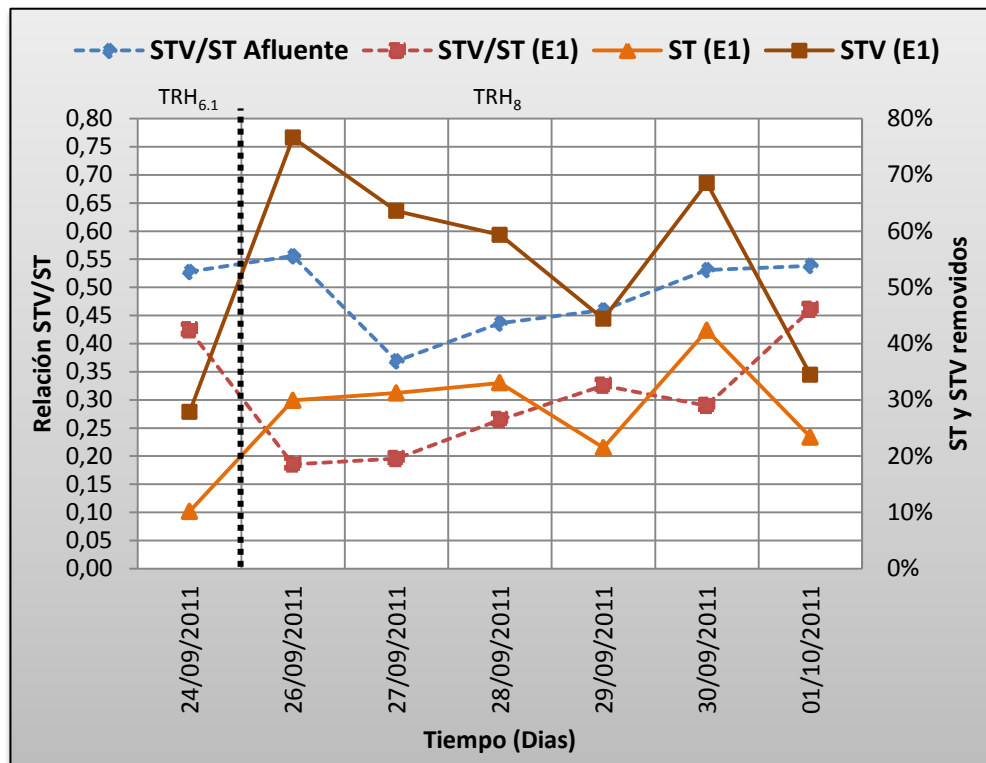
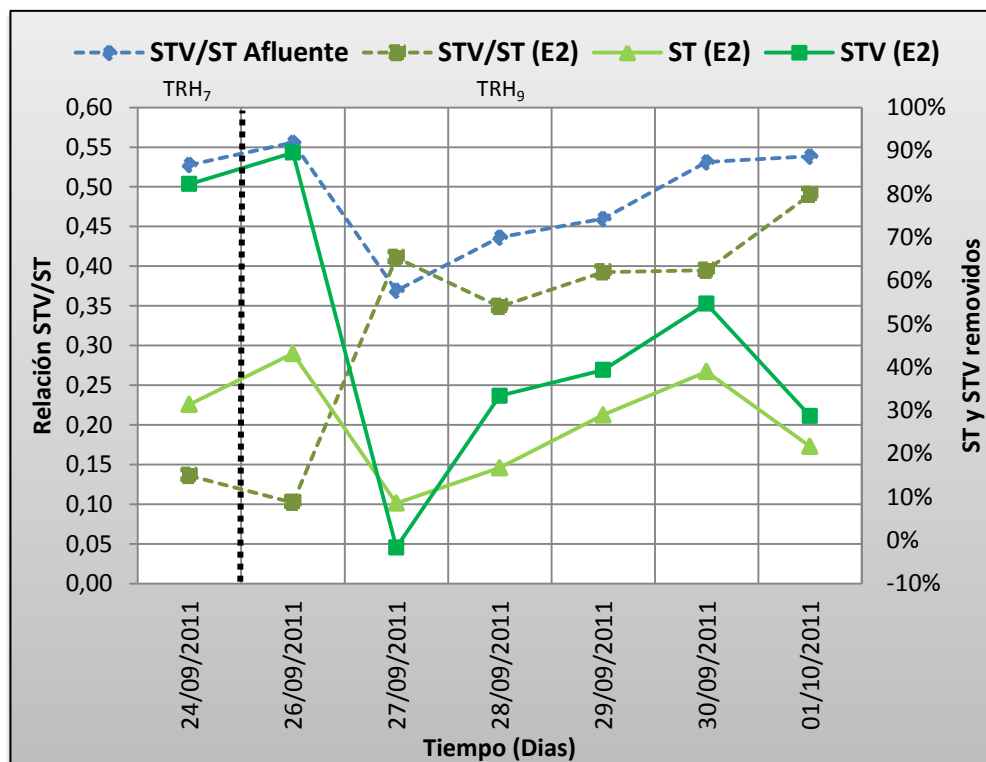


Figura 41. Comportamiento de los sólidos en E2 – en discontinuidad



E2 y sus resultados de la semana que cerro septiembre indican que la aparente estabilidad en la fracción orgánica se alteró a raíz de la discontinuidad en el nivel del sustrato y/o fuertes choques tras el flujo, al ir de 0.10 a un intervalo de [0.35-0.49]. Con remociones de ST que se ubicaron en un nivel medio, 43.14%, la serie DQO de septiembre 27 genero efectos negativos al contraer el sistema en su éxito desde [8.58-38.95]%. Para los STV ese mismo incidente hizo más abrupta la caída, de 89.56 al -1.68%, sin embargo el sistema se “recompuso” al registrar índices entre el [33.40-54.64]% antes de concluir la semana

Tabla 20. Promedio de los parámetros monitoreados – fase continua (E1) y discontinua (E2).

Parámetro	TRH _{6.1} y TRH ₇			TRH ₈ y TRH ₉		
	Afluyente	E1	E2	Afluyente	E1	E2
Unidades de pH	8.03	7.63	7.65	8.66	7.91	7.86
Alcalinidad Parcial AP (mg/L CaCO ₃)	493.13	536.88	541.88	655.83	656.67	652.50
Alcalinidad Intermedia AI (mg/L CaCO ₃)	152.25	129.50	132.00	180.42	156.67	163.33
Índice AI/AP	0.32	0.25	0.25	0.29	0.24	0.25
Ácidos Grasos Volátiles AGV (meq/L)	1.43E-3	7.83E-4	1.05E-3	2.10E-3	1.21E-3	1.26E-3
DQO (mg/L)	507.75	227.10	213.10	758.58	326.79	332.05
<i>DQO removida (%)</i>	-	54.55	58.06	-	56.23	55.55
ST (mg/L)	953.00*	856.00*	653.80*	1080.90	749.12	794.00
<i>Remoción ST (%)</i>	-	10.18	31.40	-	30.22	26.34
STV (mg/L)	503.00*	263.00*	88.90*	522.67	221.03	296.17
<i>Remoción STV (%)</i>	-	27.83	82.33	-	57.82	40.65
Relación STV/ST	0.53	0.42	0.14	0.48	0.29	0.36

* Solo un registro (ST y STV, Septiembre 24)

5.3.4 Fase 4. Operación discontinua fuerte

Extendido el sometimiento de los mantos de lodo a condiciones hidrodinámicas cada vez menores, y superadas algunas situaciones que impedían proceder de manera simultánea bajo el régimen establecido para la PTAR UPB, al reasumir las operaciones de cada UASB estos se supeditaron a fuertes choques en la entrada con el fin de cumplir lo pactado en la programación (Tabla 6).

Era entonces el punto al cual se quería llegar, exponer la biomasa de manera discontinua y asistir el sistema con altas cargas provenientes del tratamiento preliminar UPB (Sist PTAR), lo cual durante dos semanas caracterizo la llamada Fase 4 conforme se indica en la Tabla 21.

Tabla 21. Condiciones operacionales reactores UASB durante fuertes discontinuidades.

FECHA	Reactor UASB No.1		Reactor UASB No.2	
	Flujo (m ³ /h)	TRH _{10.1} teórico	Flujo (m ³ /h)	TRH _{10.2} teórico
24/10/2011 04/11/2011	0.0366*	3:05:36.60	0.0366*	3:09:19.80

*Dos bombas peristálticas operando por cada reactor donde la capacidad dosificadora unitaria aplicada fue la máxima por este lapso (18.3 l/h).

5.3.4.1 pH y Alcalinidad (Relación Al/AP) – fase discontinua fuerte

Las valoraciones correspondientes a los parámetros referenciados están inscritas en las Figuras 42 y 43, donde se agrupan los comportamientos particulares del sistema que fueron registrados al ejecutar el monitoreo.

El afluente durante la primera semana de esta cuarta fase fue bajo e irregular para la primer variable si se compara con registros anteriores, de 7.25 ascendió a 7.60 para luego caer cerca de la neutralidad, de ahí que resultaran magnitudes Al/AP de 0.50 y 0.67 las cuales ya tenían precedentes. Para la segunda serie continua de registros, la primera magnitud notifico una gradual alza cercana a la unidad a partir de 7.60, que conllevó a las proporciones surgidas entre alcalinidades a reducirse de 0.50 a 0.30.

Para los efluentes y por ende en los reactores sus actividades fueron “uniformes” en las dos semanas bajo los TRH₁₀, sin importar la irregularidad en la entrada, lo cual destaca la positiva capacidad buffer alcanzada a estas alturas en la operación.

E1 fijo registros con ligeras diferencias en sus pH e indicadores Al/AP, de [7.42 – 7.58] y [0.24 – 0.30] respectivamente, que de manera “sorprendente” dejaron ver la posibilidad de una biomasa sometida a un “menor” TRH pues esta descarga se manejó cerca al límite recomendado entre alcalinidades.

E2 genero también índices muy ajustados y consistentes, pHs de [7.42 – 7.60] y relaciones AI/AP entre [7.27 – 7.33], que acorde con las ultimas pautas del segundo parámetro sugirieron la necesidad de reducir el TRH como medida para evitar principios de acidificación.

Figura 42. Comportamiento del pH – fase discontinua fuerte

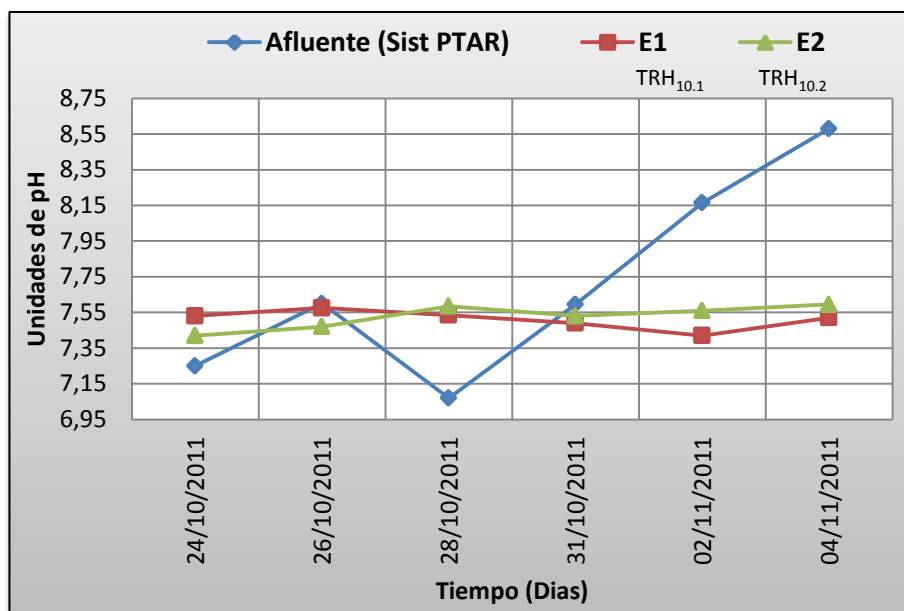
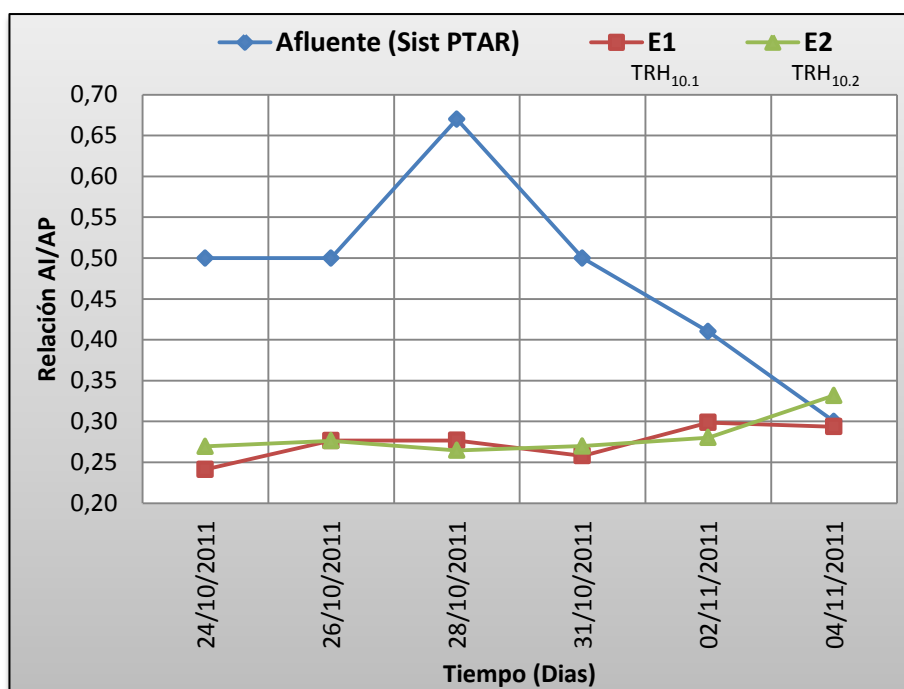


Figura 43. Relación AI/AP – fase discontinua fuerte



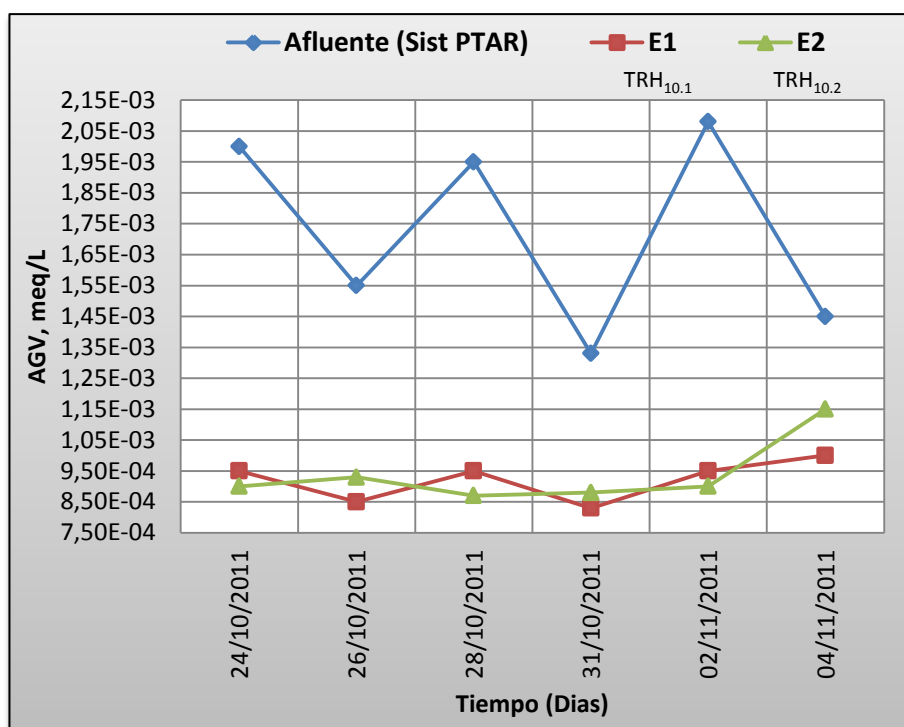
5.3.4.2 Ácidos Grasos Volátiles (AGV) – fase discontinua fuerte

Como una extensión destacada que complementa la perspectiva del índice AI/AP el sistema expone en la Figura 44 las valoraciones correspondientes a los Ácidos Grasos Volátiles, generados principalmente tras cruciales TRH₁₀ acompañados de fuertes pautas.

Para el afluente su conducta estableció irregularidades al ir entre caídas y ascensos en las dos semanas que intervino, con registros que tendieron hacia 0.0013 y 0.0020 meq/L, pero que estuvieron favorablemente por encima de los efluentes.

Las descargas de los UASB por su parte evidenciaron “sincronía” en sus resultados y se caracterizaron por las estrechas diferencias, E1 entre [0.00083 – 0.00100] meq/L y E2 entre [0.00087 – 0.00115] meq/L, que sin duda ayudaron en la dilatada estabilidad del sistema al expresar los menores cambios en las concentraciones de AGV.

Figura 44. Ácidos Grasos Volátiles – fase discontinua fuerte

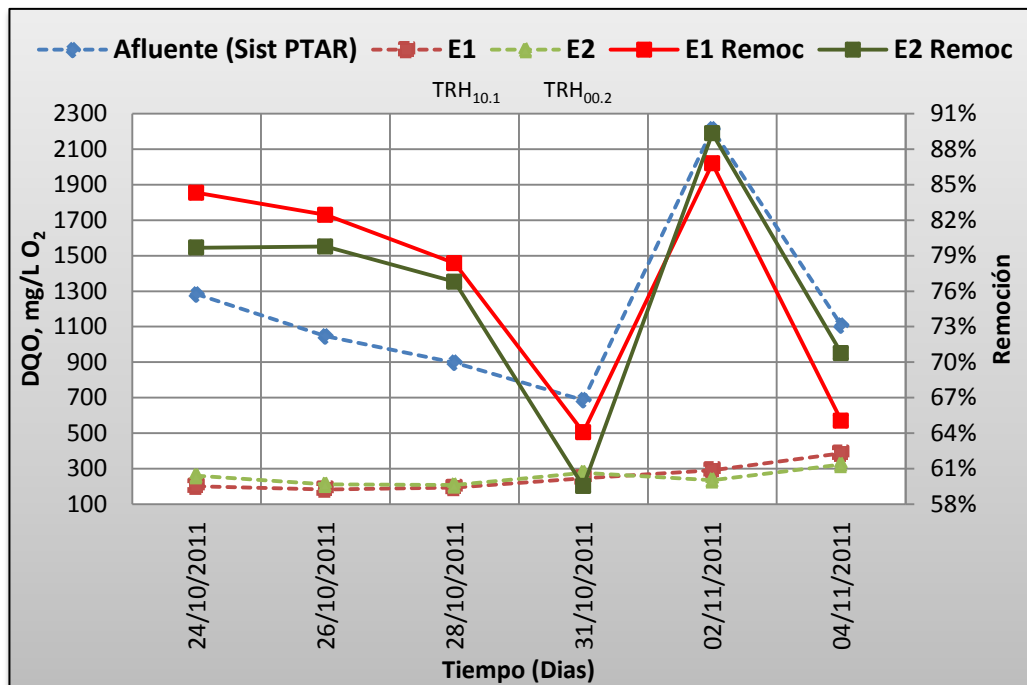


5.3.4.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO) – fase discontinua fuerte

Las valoraciones puntuales correspondientes a la operación extendida del sistema y aquellas proporciones que relacionan las utilidades alcanzadas en esta avanzada fase son reveladas en la Figura 45, como últimos indicios en la operación del tratamiento anaerobio a escala piloto.

Para el afluente su primera serie de registros fue relativamente alta aunque se redujo gradualmente, de 1282 a 897mg/L O₂. Entretanto la segunda fue irregular, al ascender desde 687.049 a un notable máximo de 2211.124 mg/L O₂ para después situarse ligeramente por debajo del primer registro en esta fase de seguimiento.

Figura 45. DQO en el sistema – fase discontinua fuerte



E1 expreso una estrecha diferencia en los registros de su primera semana, de 183.725 a 201.243 mg/L O₂, pero el influjo del suministro domino las remociones llevándolas al 84.31 y 78.35% (altos índices). En la segunda los indicadores fueron ascendiendo desde 246.791 hasta 386.935 mg/L O₂, semejante a lo visto en el paso de TRH_{6.1} a TRH₈, que en términos de eficiencia para los límites semanales bordeo el 65% (medio-alto) y fue del 86.78% (alta) cuando el registro DQO fue sumamente alto.

E2 por su parte durante la primera semana fue cayendo en la descarga, de 260.805 a 208.236 mg/L O₂, y al hacer la conversión de su rendimiento en cifras pasó del 79 al 76% (altos índices) dadas las proporciones individuales. La semana siguiente par de sus registros señalaron una corta diferencia, 278.075 y 236.250 mg/L O₂, y finalizo con un 323.870 mg/L O₂ lo cual en conjunto sugiere una conducta parcial semejante a la vista en TRH₉. Aun así la

repercusión del “irregular” afluente genero remociones de ≈ 60 y 70% en los límites de esta serie, y de 89.32% (líderos entre la alta y máxima depuración) con un registro DQO sin precedentes por su alto nivel

5.3.4.4 Sólidos – fase discontinua fuerte

Índices de las proporciones STV/ST que se conjugaron en el tratamiento a escala laboratorio y de las particulares reducciones registradas en los efluentes son señaladas en las Figuras 46 y 47, ante las “perturbaciones” que a nivel interno se enfrentaron por 2 semanas en el flujo.

Para el suministro su pauta al relacionar sólidos totales y sólidos volátiles fluctuó por lo general sobre 0.50 e indicó a 0.62 como el máximo término, la cual por fortuna mantuvo su relativa diferencia al compararse con las salidas

E1 para la relación STV/ST limito las cifras de $[0.33 - 0.41]$, ligeramente por encima de su más reciente serie y semejante a lo visto en fase 2, donde la pauta se elevó un tanto al final. Sin embargo, la discontinuidad extendida en la capacidad de retener fracciones suspendidas y disueltas llevo todo a que los resultados presentaran a unos ST en distintos niveles tras valorarse, pares bajos, regulares y medio-altos con un intervalo de $[4.05 - 57.36] \%$. Los registros STV por su parte fueron en mayoría de medio a alto, $[46.34 - 75.99] \%$, mientras par indicadores se ubicaron en los extremos de la serie del 30% .

E2 de acuerdo con la primera magnitud fue decayendo en cada semana pero el conjunto de proporciones se movió entre $[0.31 - 0.44]$, sutilmente por debajo de las pautas en fase 2 (continuidad) y fase 3 (discontinuidad), además de manera puntual señalo cifras “ajustadas” con los indicadores del afluente. Al establecer resultados en cuanto a la retención del material inmerso en el agua residual, el manto de lodo revelo que la irregular tendencia promovida por el alimento del sistema (ver Figura 41) acentuó aún más las puntuales diferencias en los niveles de ST y STV. El amplio contraste se dio en los límites de esta fase, los primeros establecieron dilatados registros con un intervalo de $[4.18 - 63.4] \%$ mientras que los segundos se situaron cerca del 22 y 60% , con un máximo del 76% .

Figura 46. Comportamiento de los sólidos en E1 – fase discontinúa fuerte

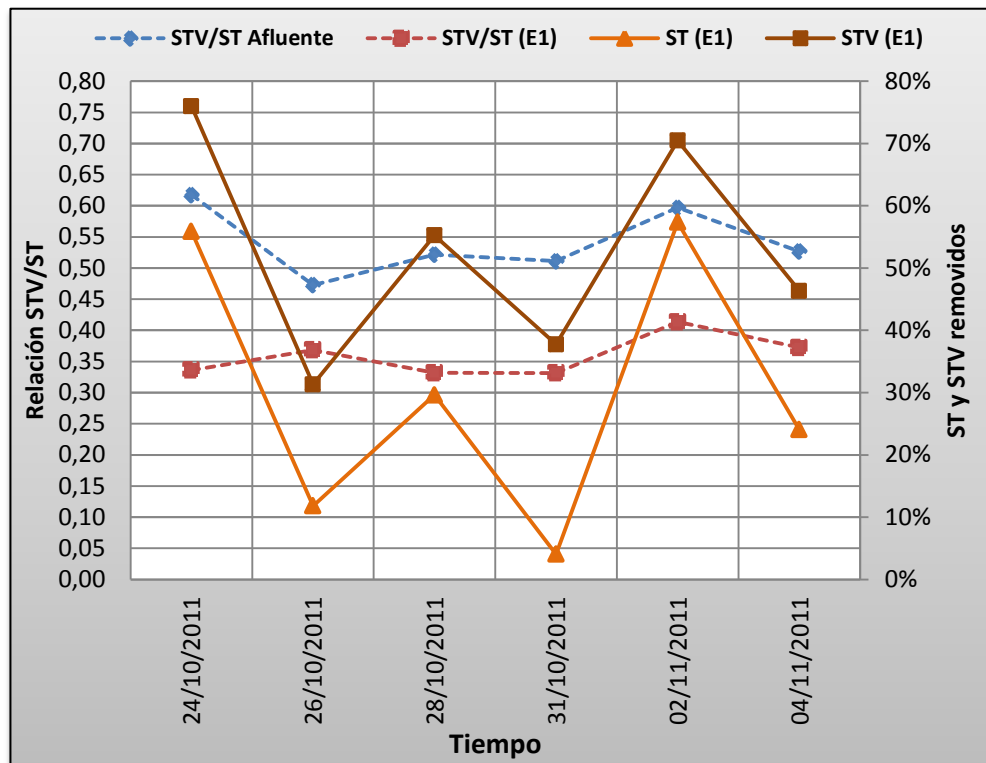


Figura 47. Comportamiento de los sólidos en E2 – fase discontinúa fuerte

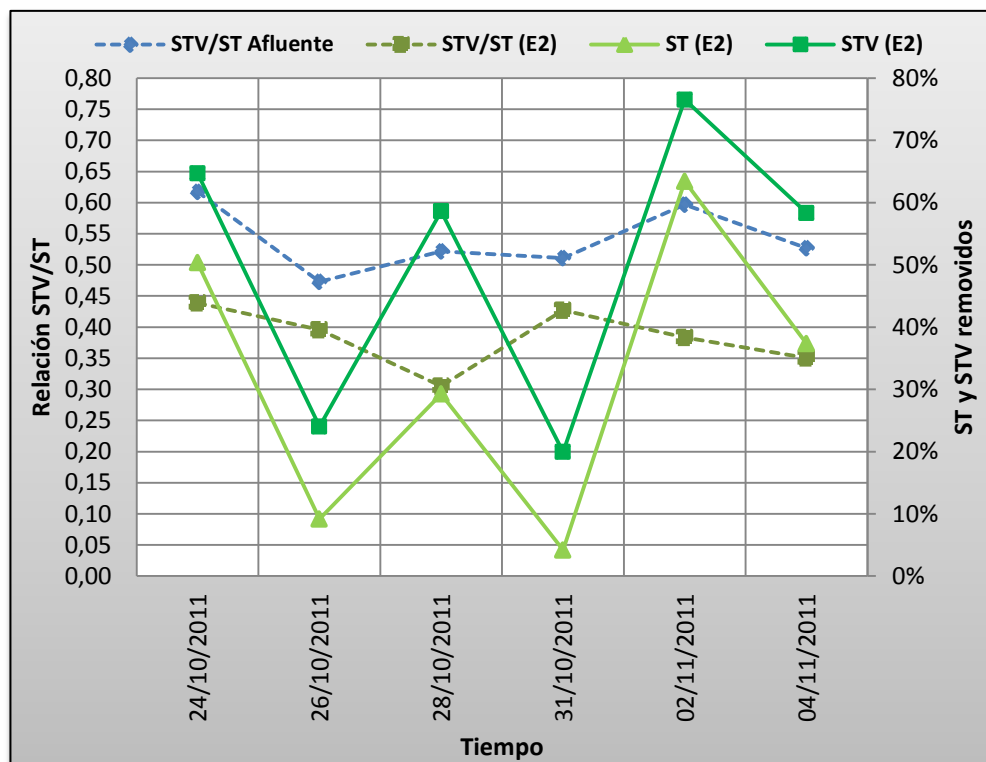


Tabla 22. Promedio de los parámetros monitoreados – fase discontinua fuerte

Parámetro	TRH _{10.1} y TRH _{10.2}		
	Afluente	Efluente 1	Efluente 2
Unidades de pH	7.71	7.51	7.53
Alcalinidad Parcial AP (mg/L CaCO ₃)	383.33	553.33	527.50
Alcalinidad Intermedia AI (mg/L CaCO ₃)	174.17	151.67	149.17
Índice AI/AP	0.48	0.27	0.28
Ácidos Grasos Volátiles AGV (meq/L)	1.73E-3	9.22E-4	9.38E-3
DQO (mg/L O₂)	1205.29	250.88	253.16
<i>DQO removida (%)</i>	-	76.84	75.97
ST (mg/L)	1136.20	717.33	688.63
<i>Remoción ST (%)</i>	-	30.47	32.28
STV (mg/L)	631.95	259.52	264.87
<i>Remoción STV (%)</i>	-	52.86	50.36
Relación STV/ST	0.54	0.36	0.38

6. CONCLUSIONES

- Los caudales recibidos en PTAR UPB a las 10, 14 y 16 horas son los de mayores índices (1,27-1,84 y 1,12-1,67 L/seg), sin embargo el pH más alto se reitera entre las 5-7pm (8,67-8,89).
- Las condiciones del flujo habitual señalan a nivel teórico que un caudal entre 0.60-1.25 L/seg (7.88-4.50 horas) tiene mejores perspectivas que alguno superior a 1.70 l/seg, ya que este último no genera índices de remoción por encima del 50%.
- El ensayo AME bajo la aplicación de distintos sustratos avalo que estímulos como los aportados por una amplia fuente de carbono conllevan a obtener mayores producciones de CH₄, con lo cual se desestimaron otros posibles factores de inhibición (pH, temperatura, capacidad buffer entre otros).
- La irregular conducta recibida en PTAR UPB a través del suministro residual, a pesar de ser una circunstancia propia del dinamismo horario, conlleva a que los ejercicios en reactores UASB se vieran reiteradamente limitados.
- Alimentar un sistema UASB a escala laboratorio, como el referido, con una serie de cargas orgánicas diluidas para acondicionar toda la dinámica del sistema no fue lo ideal, porque ciertas de sus pautas de rastreo (AI/AP, DQO y DBO) mostraron que no favorecieron la incipiente acción del consorcio bacteriano.
- A pesar de enfrentar etapas con un pH singularmente crítico, donde las fluctuaciones fueron del límite para una adecuada digestión anaerobia (pH de 7.8) a estar por encima de las 8.0 unidades, el medio demostró su capacidad al neutralizar los efectos negativos que pudiera acarrear la acumulación de subproductos.

- La relación entre alcalinidades (AI y AP) tras conseguir posicionarse por debajo de 0.30 condujo a que los términos de los ácidos grasos volátiles se redujeran, lo cual es signo de ciertos principios de sobrecarga en la digestión anaerobia.
- Una vez lograda la estabilidad operativa UASB, en medio de irregulares niveles de DQO afluente, predominando el flujo continuo (de TRH₃-TRH₉) los indicadores de depuración terminaron estancándose del 52-63%. Sin embargo la exposición a fuertes choques discontinuos llevo la operación a una exitosa e inesperada remoción del 70-85% en solo dos semanas de trabajo.
- La reducción de macronutrientes en el ciclo TRH₂-TRH₅ más representativa fue la del Fosforo, aunque sus términos se manejan generalmente bajos (9-20% E1 y 18-26% E2). Para el caso del Nitrógeno sus determinaciones no contaron con cifras consecutivas de confianza.
- La capacidad de entrapamiento en el lodo del material solido contenido en el flujo (ST y STV), desde TRH₃-TRH₅, ascendió ligeramente lo cual al obtener muestras dirigidas al ensayo AME permitió corroborar el paso de un inoculo bastante denso a uno más espeso.
- El escenario ideal para iniciar la operación en un reactor UASB implicaría que el suministro tendría que enriquecerse con una fuente de carbono. De manera aleatoria se entraría a jugar con la dosis a aplicar y con el tipo de flujo a generar (continuo o discontinuo), pues dados los resultados las necesidades son más urgentes cuando no hay interrupciones.

7. RECOMENDACIONES

- Con el fin de aportar mayores garantías de operación y calidad a partir del caudal que ingresara a los reactores tipo RAP, se propone la construcción de un tanque de almacenamiento como gran soporte del sistema en la distribución por 24 horas-7 días.
- Los términos del ensayo AME desarrollado implicaron diversas alternativas, donde la fuente de carbono (glucosa) como vía de estímulo para la digestión abrió el camino para evaluar futuros escenarios (lodo en aclimatación y lodo granular). Por lo tanto se debe seguir aplicando este ensayo como vía económica de control en la PTAR UPB.
- Al buscar mejorar la marcha de un reactor con escaso tiempo de operación las cargas orgánicas que suplen necesidades cotidianas no deben fluctuar, ya que pueden influenciar la caída de la vulnerable población metanogénica.
- Al disponer de un perfil de llaves en los UASB serie conveniente establecer el contenido de sólidos que por altura alberga el manto desarrollado.
- Como respuesta ante la evidente carencia de una fuente de carbono durante el tratamiento PTAR UPB es necesario retomar la operación a escala laboratorio con tal modificación. Así, se establecerá hasta donde llega su positiva incidencia entre la fracción orgánica e inorgánica incluida en las alcalinidades (AI y AP), remoción de DQO y retroalimentada con los macronutrientes.

BIBLIOGRAFIA

- APHA. (2005). *Standar Methods for the Examination of water and wastewater* (21 ed.). Washington, DC.
- CRITES, R., & TCHOBANOGLAUS, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Bogotá: McGraw Hill.
- GONZÁLEZ MANCILLA, M., & OTERO GIRALDO, A. M. (2005). *Influencia de la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. Tesis de Grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali.
- HULSHOFF POL, L. (1989). *The phenomenom of granulation of anaerobic sludge*. Netherlands: Agricultural University of Wageningen.
- ISA, M., FAROOQI, I., & SIDDIQI, R. (1993). Methanogenic Activity Test for Study of Anaerobic Processes. *Indian J. Environm. Hlth*, 35(1), 1-8.
- JURADO V., C., & ORTIZ O., N. (2006). *Selección de inóculo para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón de yuca*. Tesis de Grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali.
- LUOSTARINEN, S. (2005). *Anaerobic on-site wastewater treatment at low temperatures*. Thesis. University of Jyväskylä (FIN). Faculty of Mathematics & Science. Jyväskylä : University Library of Jyväskylä .
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (s.f.). Recuperado el 25 de Noviembre de 2011, de <http://www.fao.org/docrep/T0541E/T0541E06.htm>
- REPUBLICA DE COLOMBIA, DIRECCION DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO. (2000). E. En M. D. DESARROLLO, *RAS 2000, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Basico*. Bogotá.
- RIPLEY, L., BOYLE, W., & CONVERSE, j. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal - Water Pollution Control Federation*, 406-411.
- ROCHA, M. A. (2003). *Estudos da actividade metanogen de lodos e da biodegradabilidade anaerobia de efluentes se industrias de bebidas*. Recife, Pernambuco, Brasil.
- RODRIGUEZ V., J. A. (s.f.). Recuperado el 22 de Noviembre de 2011, de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>

- ROMERO ROJAS, J. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales, teoría y principios de diseño*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- SEGHEZZO, L. (26 de Mayo de 2004). *Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions. Thesis. Wageningen University*. Recuperado el 4 de Octubre de 2011, de <http://edepot.wur.nl/121555>
- TORRES, P., & PEREZ, A. (2010). Actividad Metanogencia Especifica: una herramienta de control y optimizacion del sistema de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Redalyc*, 5-14.
- TORRES, P., RODRIGUEZ, J., BARBA, L., & MARMOLEJO, L. (2009). Tratamiento combinado de lechada de un relleno sanitario y aguas residuales municipales por reactores UASB. *Water Science & Technology*, 491-495.
- Universidad del Valle (Col); Corporacion Autonoma Regional del Valle; Agricultural University of Wageningen. (1987). *Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodo UASB: manual del curso*. Cali, Colombia.
- VON SPERLING, M., & CHERNICHARO, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. London (UK): IWA Publishing.

ANEXOS

Anexo 1. Semana 1 - Series de monitoreo sistema PTAR UPB (pH y caudal).

DIA Calendario - HORA	Sumatoria Horaria	AFLUENTE		EFLUENTE	
		Caudal (L/seg)	pH	Caudal (L/seg)	pH
(1) Lunes, 6 am	6	0,030			
7	7	0,111			
8	8	0,939			
9	9	0,593	8,26		
10	10	1,425	8,40	0,002	7,39
11	11	0,730	8,49	0,002	7,50
12	12	0,824	8,78	0,005	
13	13	0,566	8,50	0,591	7,68
14	14	0,946	8,23	0,664	7,68
15	15	0,797	8,25	0,539	7,70
16	16	1,083	8,43	0,774	7,71
17	17	0,609	8,51	0,605	7,75
18	18	0,635	8,72	0,781	7,68
19	19	0,231	8,82	0,508	7,26
20	20	0,062	8,67	0,676	7,45
(2) Martes, 6 am	30	0,079	8,27		
7	31	0,287	8,13		
8	32	1,317	8,49		
9	33	1,155	8,69	0,017	7,80
10	34	1,346	8,66	0,023	7,18
11	35	0,795	8,52	0,490	7,60
12	36	0,876		0,844	7,61
13	37	1,675	8,12	0,721	7,64
14	38	1,841		0,998	7,72
15	39	0,601	8,54	1,036	7,71
16	40	0,721	8,43	1,054	7,81
17	41	0,504	8,68	0,969	7,81
18	42	0,542	8,60	0,789	7,80
19	43	0,243	8,58	0,451	7,86
20	44	0,146	8,69	0,447	7,81
(3) Miércoles, 6 am	54	0,024	7,85		
7	55	0,195	8,04		
8	56	1,080	8,65		
9	57	0,971	8,62	0,020	7,91
10	58	1,267	8,71	0,014	7,85
11	59	0,931	8,63	0,763	7,83
12	60	1,057	8,74	0,816	7,74

13	61	0,861	8,73	0,655	7,83
14	62	1,166	8,63	0,915	
15	63	0,866	7,99	0,672	7,77
16	64	1,042	8,41	0,682	7,75
17	65	0,485	8,69	0,852	7,80
18	66	0,825	8,73	1,050	7,78
19	67	0,316	8,62	0,608	7,73
20	68	0,124	8,83	0,535	7,78
(4) Jueves, 6 am	78	0,027	7,47		
7	79	0,216	8,23		
8	80	1,029	8,25		
9	81	0,695	8,20	0,029	7,87
10	82	1,394	8,46	0,016	7,84
11	83	1,063	8,51	0,559	7,71
12	84	1,052	8,64	0,738	7,86
13	85	1,077		0,462	7,70
14	86	1,049	8,17	0,636	7,74
15	87	1,185	7,92	0,825	7,73
16	88	1,095	8,42	0,922	7,84
17	89	1,021	8,39	0,848	7,80
18	90	0,584	8,66	0,903	7,93
19	91	0,232	8,69	0,861	7,92
20	92	0,112	8,66	0,675	7,95
(5) Viernes, 6 am	102	0,140	8,29		
7	103	0,249	7,75		
8	104	0,617	8,36		
9	105	0,654	8,36	0,030	8,040
10	106	1,172	8,60	0,026	7,930
11	107	1,024	8,44	0,384	7,880
12	108	0,663	8,67	0,425	7,930
13	109	0,689	8,62	1,023	7,810
14	110	0,727	8,08	0,801	7,830
15	111	1,094	7,84	0,528	7,900
16	112	1,118	8,49	0,780	7,900
17	113	0,307	8,68	0,856	7,840
18	114	0,493	8,80	1,000	7,850
19	115	0,247	8,73	0,955	7,900
20	116	0,291	8,65	0,919	7,840
(6) Sábado, 7 am	127	0,229	7,79		
8	128	0,276	8,62		
9	129	0,621	7,99		
10	130	1,047	8,70	0,063	7,970
11	131	0,414	8,47	0,055	8,000
12	132	0,469	8,71	0,045	8,000

Anexo 2. Semana 2 - Series de monitoreo sistema PTAR UPB (pH y caudal).

DIA Calendario - HORA	Sumatoria Horaria	AFLUENTE		EFLUENTE	
		Caudal (L/seg)	pH	Caudal (L/seg)	pH
(8) Lunes, 6 am	174	0,064	7,13		
7	175	0,172	7,81		
8	176	1,033	8,59		
9	177	0,542	8,53	0,001	7,84
10	178	1,774	8,44	0,002	7,86
11	179	0,722	8,17	0,230	7,86
12	180	0,884	8,22	0,489	7,86
13	181	0,725	8,49	0,662	7,78
14	182	1,672	8,46	0,663	7,76
15	183	0,840	8,48	0,731	7,77
16	184	1,287	8,56	0,758	7,89
17	185	0,596	8,71	0,763	7,79
18	186	1,142	8,66	0,947	7,73
19	187	0,511	8,62	0,711	7,75
20	188	0,434	8,30	0,526	7,82
(9) Martes, 6 am	198	0,012	7,44		
7	199	0,220	7,54		
8	200	1,099	8,28		
9	201	1,093	8,31	0,021	8,01
10	202	1,765	8,80	0,155	7,94
11	203	0,932	8,63	0,330	7,88
12	204	0,705	8,70	0,533	7,88
13	205	1,490	8,63	0,687	7,91
14	206	1,490	8,42	0,687	7,92
15	207	0,991	8,16	0,705	7,89
16	208	1,431	8,58	0,696	7,94
17	209	0,404	8,62	0,940	7,90
18	210	0,682	8,70	0,735	7,95
19	211	0,449	8,82	0,686	7,93
20	212	0,249		0,703	7,93
(10) Miércoles, 6 am	222	0,031	8,19		
7	223	0,364	8,11		
8	224	1,152	8,54		
9	225	1,082	8,35	0,021	8,03
10	226	1,841	8,73	0,016	8,00
11	227	0,583	8,54	0,537	7,85
12	228	0,948	8,56	0,645	7,84

13	229	0,965	8,00	0,644	7,83
14	230	1,159	8,32	0,685	7,83
15	231	0,770	8,18	0,714	7,85
16	232	1,355	8,45	0,715	7,90
17	233	0,367	8,64	0,693	7,83
18	234	0,993	8,89	0,989	7,81
19	235	0,198	8,85	0,918	7,84
20	236	0,214	8,85	0,961	7,86
(11) Jueves, 6 am	246	0,103	7,79		
7	247	0,239	7,59		
8	248	0,688	8,63		
9	249	0,926	8,46	0,017	8,04
10	250	2,053	8,79	0,079	7,96
11	251	0,923		0,406	7,92
12	252	0,808	8,61	0,560	7,86
13	253	1,202	8,48	0,612	7,79
14	254	1,358	8,56	0,641	7,86
15	255	1,041	8,55	0,815	7,81
16	256	1,173	8,60	0,692	7,93
17	257	0,838	8,54	0,788	7,88
18	258	0,961	8,59	0,719	7,99
19	259	0,512	8,85	0,698	8,00
20	260	0,263	8,73	0,592	7,97
(12) Viernes, 6 am	270	0,245	7,51		
7	271	0,314	7,97		
8	272	1,024	8,42		
9	273	0,886	8,38	0,018	8,08
10	274	1,399	8,62	0,043	8,09
11	275	0,548	8,33	0,516	7,91
12	276	1,362	8,69	0,667	7,93
13	277	1,365		0,719	7,93
14	278	0,815	8,62	0,613	7,89
15	279	1,459		0,704	7,90
16	280	0,941	8,49	0,749	7,92
17	281	0,758	8,31	0,740	7,88
18	282	0,347	8,87	0,912	
19	283	0,646	8,89	0,914	7,92
20	284	0,411	8,85	0,895	7,94
(13) Sábado, 7 am	295	0,141			
8	296	0,755	7,55		
9	297	0,439	8,32		
10	298	0,813	8,22	0,019	8,17
11	299	0,582	8,04	0,187	7,88
12	300	0,421	8,75	0,334	7,91

Anexo 3. Semana 1 - Condiciones de presión y temperatura ensayo AME.

FECHA	HORA	Presión		Presión prom diaria atm	T (°C)
		hPa	atm		
20110905 Lunes	09:00:00 am	907,0	0,895	0,893	28,0
	10:00:00 am	907,0	0,895		29,3
	11:00:00 am	906,4	0,895		30,7
	12:00:00 pm	905,5	0,894		29,9
	01:00:00 pm	904,8	0,893		29,5
	02:00:00 pm	904,2	0,892		30,6
	03:00:00 pm	903,7	0,892		29,2
	04:00:00 pm	903,4	0,892		29,8
	05:00:00 pm	903,2	0,891		28,0
	06:00:00 pm	903,5	0,892		25,8
	07:00:00 pm	904,2	0,892		24,3
	08:00:00 pm	905,1	0,893		23,6
	09:00:00 pm	906,3	0,895		23,6
	10:00:00 pm	906,5	0,895		22,7
11:00:00 pm	906,6	0,895	21,7		
20110906 Martes	12:00:00 am	906,3	0,895	0,893	21,3
	01:00:00 am	905,7	0,894		21,1
	02:00:00 am	905,4	0,894		20,9
	03:00:00 am	905,4	0,894		20,9
	04:00:00 am	905,6	0,894		20,5
	05:00:00 am	905,4	0,894		20,3
	06:00:00 am	905,6	0,894		20,0
	07:00:00 am	906,3	0,895		22,6
	08:00:00 am	906,7	0,895		26,6
	09:00:00 am	906,9	0,895		29,1
	10:00:00 am	906,9	0,895		29,7
	11:00:00 am	906,2	0,894		31,3
	12:00:00 pm	905,4	0,894		30,5
	01:00:00 pm	904,4	0,893		30,9
	02:00:00 pm	903,6	0,892		29,7
	03:00:00 pm	903,0	0,891		28,9
	04:00:00 pm	902,5	0,891		29,2
	05:00:00 pm	903,1	0,891		25,8
	06:00:00 pm	903,6	0,892		24,7
	07:00:00 pm	904,4	0,893		23,8
08:00:00 pm	905,0	0,893	23,4		
09:00:00 pm	905,9	0,894	22,1		
10:00:00 pm	906,4	0,895	22,0		
11:00:00 pm	906,2	0,894	21,3		

20110907 Miércoles	12:00:00 am	905,8	0,894	0,893	20,8
	01:00:00 am	905,3	0,894		20,4
	02:00:00 am	904,8	0,893		19,6
	03:00:00 am	904,5	0,893		19,5
	04:00:00 am	904,9	0,893		19,2
	05:00:00 am	905,4	0,894		18,8
	06:00:00 am	906,2	0,894		19,1
	07:00:00 am	907,2	0,895		21,8
	08:00:00 am	907,1	0,895		25,2
	09:00:00 am	907,1	0,895		27,8
	10:00:00 am	906,6	0,895		29,4
	11:00:00 am	905,9	0,894		31,1
	12:00:00 pm	905,0	0,893		29,5
	01:00:00 pm	903,6	0,892		28,9
02:00:00 pm	903,1	0,891	27,7		
03:00:00 pm	902,7	0,891	27,2		
04:00:00 pm	902,5	0,891	26,7		
05:00:00 pm	902,8	0,891	26,4		
06:00:00 pm	903,1	0,891	25,3		
07:00:00 pm	904,0	0,892	24,4		
08:00:00 pm	905,2	0,893	24,1		
09:00:00 pm	905,6	0,894	23,5		
10:00:00 pm	906,5	0,895	23,3		
11:00:00 pm	906,5	0,895	22,5		
20110908 Jueves	12:00:00 am	906,4	0,895	0,895	22,8
	01:00:00 am	905,5	0,894		21,9
	02:00:00 am	905,6	0,894		21,5
	03:00:00 am	905,6	0,894		21,1
	04:00:00 am	906,0	0,894		20,1
	05:00:00 am	906,6	0,895		19,1
	06:00:00 am	907,1	0,895		19,5
	07:00:00 am	908,3	0,896		22,0
	08:00:00 am	908,7	0,897		22,3
	09:00:00 am	909,0	0,897		25,1
	10:00:00 am	908,7	0,897		27,6
	11:00:00 am	907,7	0,896		29,0
	12:00:00 pm	906,8	0,895		25,3
	01:00:00 pm	905,9	0,894		24,3
02:00:00 pm	904,7	0,893	24,4		
03:00:00 pm	904,3	0,893	23,6		
04:00:00 pm	904,2	0,892	21,2		
05:00:00 pm	904,7	0,893	21,5		
06:00:00 pm	905,8	0,894	20,9		
07:00:00 pm	907,3	0,896	19,4		
08:00:00 pm	907,9	0,896	19,4		
09:00:00 pm	908,7	0,897	18,9		
10:00:00 pm	908,1	0,896	19,3		
11:00:00 pm	908,0	0,896	18,8		

FECHA	HORA	Presión		Presión prom diaria atm	T (°C)
		hPa	atm		
20110909 Viernes	12:00:00 am	907,7	0,896	0,895	18,7
	01:00:00 am	906,8	0,895		18,5
	02:00:00 am	906,6	0,895		18,7
	03:00:00 am	907,1	0,895		18,7
	04:00:00 am	907,8	0,896		18,9
	05:00:00 am	908,3	0,896		18,9
	06:00:00 am	908,6	0,897		18,8
	07:00:00 am	908,8	0,897		19,9
	08:00:00 am	909,2	0,897		22,2
	09:00:00 am	908,3	0,896		25,6
	10:00:00 am	907,7	0,896		26,6
	11:00:00 am	906,8	0,895		28,5
	12:00:00 pm	905,4	0,894		30,2
	01:00:00 pm	904,1	0,892		30,7
	02:00:00 pm	903,5	0,892		29,4
	03:00:00 pm	903,0	0,891		28,5
	04:00:00 pm	902,7	0,891		27,7
	05:00:00 pm	903,2	0,891		25,2
	06:00:00 pm	904,1	0,892		23,8
	07:00:00 pm	905,0	0,893		22,9
08:00:00 pm	906,0	0,894	22,6		
09:00:00 pm	906,9	0,895	22,3		
10:00:00 pm	907,2	0,895	22,1		
11:00:00 pm	907,2	0,895	22,2		

Fuente: IDEAM Bucaramanga,
Estación meteorológica de Neomundo

20110910 Sábado	12:00:00 am	906,8	0,895	0,894	21,4
	01:00:00 am	906,4	0,895		20,3
	02:00:00 am	906,3	0,895		19,3
	03:00:00 am	905,7	0,894		19,3
	04:00:00 am	905,7	0,894		19,6
	05:00:00 am	905,8	0,894		19,0
	06:00:00 am	906,2	0,894		18,6
	07:00:00 am	907,1	0,895		20,6
	08:00:00 am	907,0	0,895		23,2
	09:00:00 am	905,9	0,894		25,8
	10:00:00 am	906,0	0,894		27,3
	11:00:00 am	905,7	0,894		28,0
	12:00:00 pm	905,4	0,894		27,6
	01:00:00 pm	904,5	0,893		26,8
	02:00:00 pm	903,9	0,892		25,5
	03:00:00 pm	903,5	0,892		24,4
	04:00:00 pm	903,5	0,892		24,1
	05:00:00 pm	903,1	0,891		24,2
	06:00:00 pm	903,5	0,892		23,1
	07:00:00 pm	904,7	0,893		21,6
08:00:00 pm	905,8	0,894	21,4		
09:00:00 pm	906,9	0,895	21,4		
10:00:00 pm	906,6	0,895	21,5		
11:00:00 pm	906,7	0,895	21,0		
20110911 Domingo	12:00:00 am	906,8	0,895	0,895	21,0
	01:00:00 am	906,8	0,895		21,3
	02:00:00 am	906,1	0,894		20,7
	03:00:00 am	905,8	0,894		20,4
	04:00:00 am	906,4	0,895		19,9
	05:00:00 am	906,9	0,895		19,5
	06:00:00 am	907,6	0,896		19,5
	07:00:00 am	908,4	0,897		20,7
	08:00:00 am	909,3	0,897		23,3
	09:00:00 am	908,8	0,897		26,2
	10:00:00 am	908,4	0,897		28,5
	11:00:00 am	907,7	0,896		26,7
	12:00:00 pm	907,4	0,896		26,6
	01:00:00 pm	906,4	0,895		25,8
	02:00:00 pm	905,8	0,894		25,5
	03:00:00 pm	905,2	0,893		26,3
	04:00:00 pm	905,1	0,893		26,1
	05:00:00 pm	905,0	0,893		24,4
	06:00:00 pm	905,7	0,894		23,1
	07:00:00 pm	906,6	0,895		22,5
08:00:00 pm	907,5	0,896	22,0		
09:00:00 pm	908,6	0,897	21,3		
10:00:00 pm	909,0	0,897	21,7		
11:00:00 pm	909,0	0,897	21,5		

Anexo 4. Semana 2 - Condiciones de presión y temperatura ensayo AME

FECHA	HORA	Presión		Presión prom diaria atm	T (°C)
		hPa	atm		
20110912 Lunes	12:00:00 am	908,5	0,897	0,896	21,6
	01:00:00 am	908,3	0,896		21,1
	02:00:00 am	907,8	0,896		21,1
	03:00:00 am	907,7	0,896		20,8
	04:00:00 am	907,6	0,896		20,2
	05:00:00 am	908,5	0,897		20,6
	06:00:00 am	908,9	0,897		20,1
	07:00:00 am	909,6	0,898		21,0
	08:00:00 am	910,5	0,899		23,9
	09:00:00 am	910,5	0,899		26,8
	10:00:00 am	909,8	0,898		28,8
	11:00:00 am	909,0	0,897		28,5
	12:00:00 pm	908,2	0,896		26,6
	01:00:00 pm	907,3	0,896		26,2
	02:00:00 pm	906,3	0,895		25,3
	03:00:00 pm	905,7	0,894		24,9
	04:00:00 pm	905,5	0,894		24,7
	05:00:00 pm	905,4	0,894		24,3
	06:00:00 pm	905,9	0,894		23,4
	07:00:00 pm	906,7	0,895		22,4
	08:00:00 pm	907,7	0,896		21,4
	09:00:00 pm	908,7	0,897		21,2
10:00:00 pm	909,3	0,897	21,2		
11:00:00 pm	909,2	0,897	21,0		
20110913 Martes	12:00:00 am	909,1	0,897	0,895	21,2
	01:00:00 am	908,6	0,897		20,6
	02:00:00 am	908,3	0,896		20,4
	03:00:00 am	907,9	0,896		20,0
	04:00:00 am	907,6	0,896		19,8
	05:00:00 am	907,5	0,896		19,3
	06:00:00 am	908,0	0,896		19,8
	07:00:00 am	908,5	0,897		21,2
	08:00:00 am	908,7	0,897		24,1
	09:00:00 am	908,6	0,897		25,5
	10:00:00 am	908,1	0,896		28,6
	11:00:00 am	907,3	0,896		30,4

	12:00:00 pm	906,5	0,895		30,9
	01:00:00 pm	905,6	0,894		28,9
	02:00:00 pm	904,5	0,893		29,9
	03:00:00 pm	904,0	0,892		28,0
	04:00:00 pm	904,0	0,892		29,0
	05:00:00 pm	904,5	0,893		25,3
	06:00:00 pm	905,4	0,894		24,4
	07:00:00 pm	905,8	0,894		23,7
	08:00:00 pm	906,8	0,895		23,4
	09:00:00 pm	907,4	0,896		22,3
	10:00:00 pm	908,1	0,896		23,3
11:00:00 pm	908,6	0,897	23,0		
20110914 Miércoles	12:00:00 am	908,4	0,897	0,894	20,3
	01:00:00 am	907,6	0,896		20,9
	02:00:00 am	906,9	0,895		20,6
	03:00:00 am	906,2	0,894		19,3
	04:00:00 am	906,0	0,894		19,0
	05:00:00 am	906,0	0,894		20,1
	06:00:00 am	906,4	0,895		18,7
	07:00:00 am	906,4	0,895		21,5
	08:00:00 am	906,8	0,895		26,4
	09:00:00 am	906,9	0,895		25,5
	10:00:00 am	906,6	0,895		26,4
	11:00:00 am	906,2	0,894		27,7
	12:00:00 pm	905,9	0,894		28,8
	01:00:00 pm	905,0	0,893		28,6
	02:00:00 pm	904,0	0,892		28,1
	03:00:00 pm	903,4	0,892		28,6
	04:00:00 pm	902,4	0,891		29,0
05:00:00 pm	902,2	0,890	27,1		
06:00:00 pm	903,1	0,891	24,9		
07:00:00 pm	903,9	0,892	22,7		
08:00:00 pm	904,9	0,893	23,3		
09:00:00 pm	905,8	0,894	22,5		
10:00:00 pm	906,5	0,895	22,6		
11:00:00 pm	906,7	0,895	22,2		

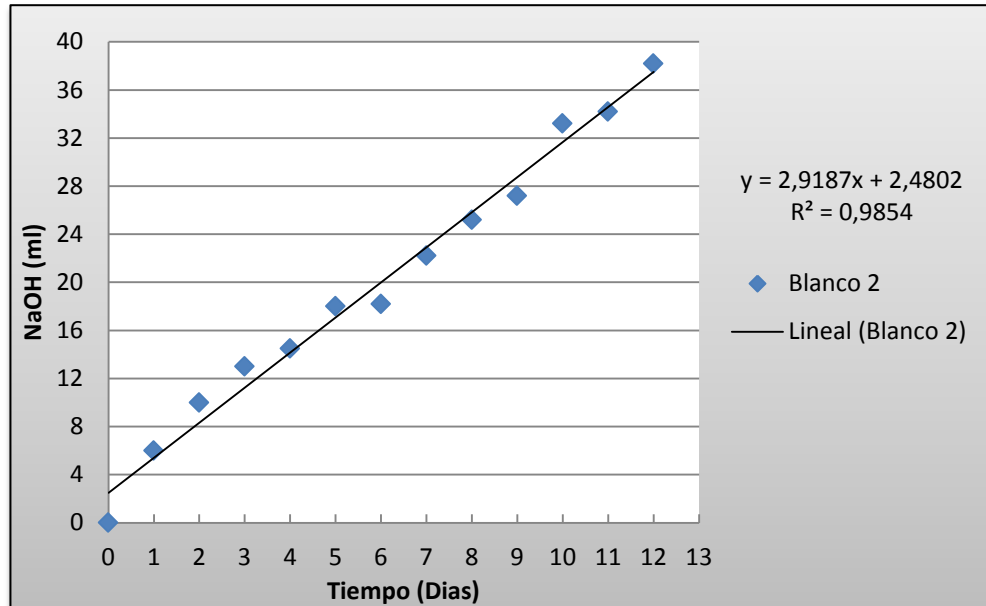
FECHA	HORA	Presión		Presión prom diaria atm	T (°C)
		hPa	atm		
20110915 Jueves	12:00:00 am	906,4	0,895	0,894	22,1
	01:00:00 am	905,7	0,894		21,6
	02:00:00 am	905,0	0,893		19,8
	03:00:00 am	904,9	0,893		18,9
	04:00:00 am	905,6	0,894		18,9
	05:00:00 am	905,9	0,894		18,5
	06:00:00 am	905,9	0,894		18,7
	07:00:00 am	907,1	0,895		21,7
	08:00:00 am	907,4	0,896		26,8
	09:00:00 am	907,3	0,896		27,8
	10:00:00 am	906,9	0,895		28,0
	11:00:00 am	906,3	0,895		31,2
	12:00:00 pm	905,5	0,894		29,3
	01:00:00 pm	904,4	0,893		29,3
	02:00:00 pm	903,6	0,892		29,5
	03:00:00 pm	903,3	0,892		29,0
	04:00:00 pm	903,1	0,891		26,3
	05:00:00 pm	903,5	0,892		24,6
	06:00:00 pm	903,8	0,892		23,2
	07:00:00 pm	904,5	0,893		22,4
08:00:00 pm	905,2	0,893	21,8		
09:00:00 pm	905,8	0,894	21,5		
10:00:00 pm	906,7	0,895	21,7		
11:00:00 pm	906,8	0,895	21,6		

Fuente: IDEAM Bucaramanga,
Estación meteorológica de Neomundo

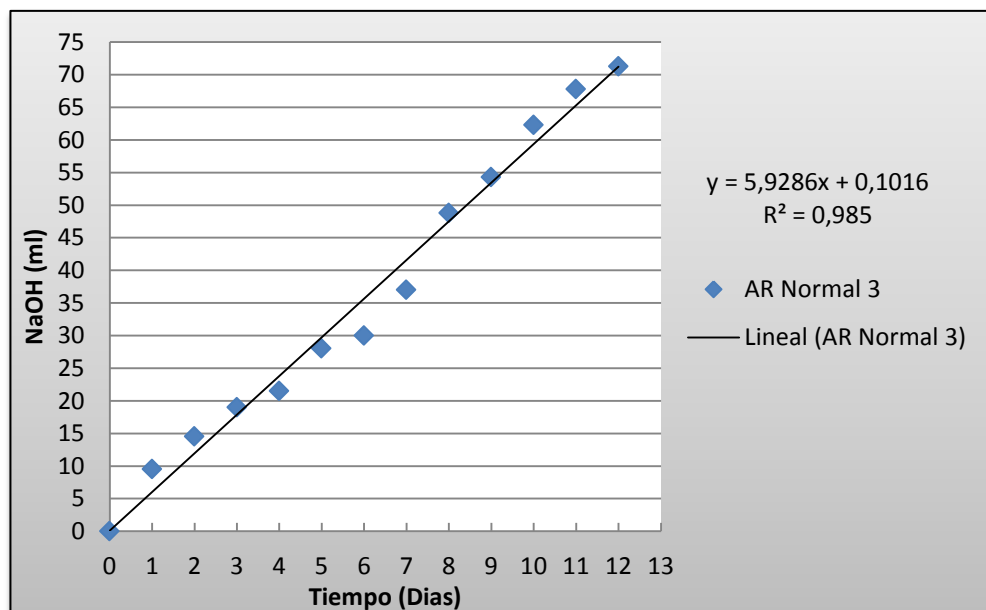
20110916 Viernes	12:00:00 am	906,5	0,895	0,894	21,0
	01:00:00 am	905,6	0,894		21,1
	02:00:00 am	905,0	0,893		20,2
	03:00:00 am	905,2	0,893		20,2
	04:00:00 am	905,2	0,893		19,9
	05:00:00 am	905,8	0,894		19,8
	06:00:00 am	906,3	0,895		20,2
	07:00:00 am	907,4	0,896		21,3
	08:00:00 am	908,2	0,896		21,5
	09:00:00 am	908,5	0,897		24,0
	10:00:00 am	908,3	0,896		24,7
	11:00:00 am	907,7	0,896		25,6
	12:00:00 pm				
	01:00:00 pm	906,0	0,894		26,5
	02:00:00 pm	904,5	0,893		30,4
	03:00:00 pm	903,5	0,892		27,7
	04:00:00 pm	902,7	0,891		29,0
	05:00:00 pm	902,8	0,891		26,5
	06:00:00 pm	903,6	0,892		24,4
	07:00:00 pm	904,9	0,893		23,3
08:00:00 pm	905,4	0,894	22,7		
09:00:00 pm	906,4	0,895	22,5		
10:00:00 pm	906,9	0,895	21,6		
11:00:00 pm	907,0	0,895	21,2		
20110917 Sábado	12:00:00 am	907,1	0,895	0,895	20,6
	01:00:00 am	906,8	0,895		20,6
	02:00:00 am	906,5	0,895		20,4
	03:00:00 am	906,2	0,894		20,1
	04:00:00 am	906,3	0,895		20,1
	05:00:00 am	906,5	0,895		19,6
	06:00:00 am	906,3	0,895		19,6
	07:00:00 am	907,3	0,896		22,6
	08:00:00 am	907,5	0,896		24,2
	09:00:00 am	907,3	0,896		26,1
	10:00:00 am	906,6	0,895		28,3
	11:00:00 am	905,9	0,894		29,6
12:00:00 pm	905,3	0,894	28,3		

Anexo 5. Gráficos y Ecuaciones de la recta en los ensayos AME

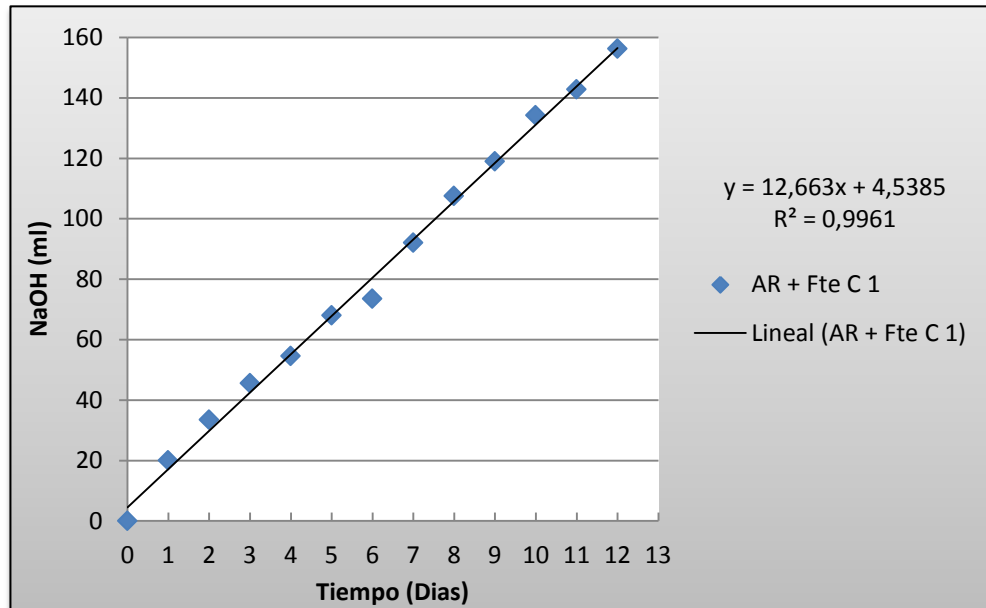
Blanco - Curva de Ajuste AME (por dispersión)



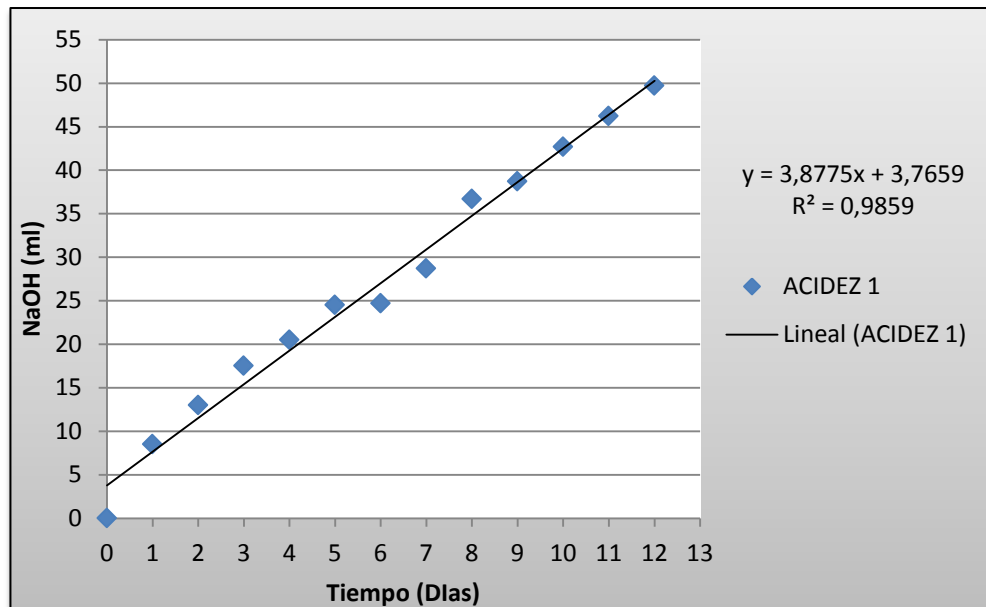
Sustrato 1 - Curva de Ajuste AME (por dispersión)



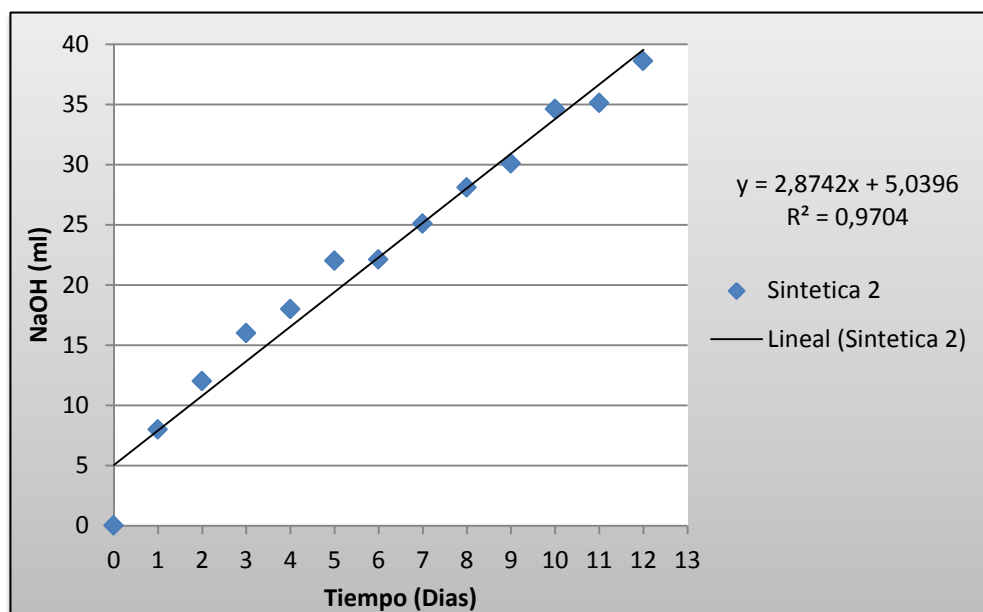
Sustrato 2 - Curva de Ajuste AME (por dispersión)



Sustrato 3 - Curva de Ajuste AME (por dispersión)



Sustrato 4 - Curva de Ajuste AME (por dispersión)



Anexo 6. Resultados de laboratorio – Compilación de pH en diversas programaciones (TRH).

FECHA	pH			TRH
	Afluente (Sist RAP)	E1 (UASB 1)	E2 (UASB 2)	
13/06/2011	7,35	7,55	7,54	TRH _{1.1} (E1) TRH _{1.2} (E2)
14/06/2011	7,23	7,56	7,57	
15/06/2011	7,38	7,47	7,49	
16/06/2011	7,37	7,59	7,60	
17/06/2011	7,64	7,51	7,65	
20/06/2011	7,88	7,48	7,42	
21/06/2011	7,26	7,37	7,40	
22/06/2011	7,26	7,39	7,39	
23/06/2011	7,28	7,47	7,57	
24/06/2011	7,18	7,30	7,37	
27/06/2011	7,42	7,41	7,40	
28/06/2011	7,39	7,48	7,47	
29/06/2011	7,32	7,37	7,39	
30/06/2011	7,42	7,42	7,45	
01/07/2011	6,99	7,26	7,23	
05/07/2011	6,78	7,58	7,43	

FECHA	Afl (Sist PTAR)	E1	E2	TRH
14/07/2011	7,99	7,32	7,22	TRH _{2.1} (E1) TRH _{2.2} (E2)
15/07/2011	7,12	7,10	7,02	
18/07/2011	7,93	7,20	7,40	
19/07/2011	8,53	7,52	7,47	
20/07/2011	8,63	7,60	7,49	
21/07/2011	7,11	7,36	7,40	TRH _{3.1} (E1) TRH _{3.2} (E2)
22/07/2011	8,61	8,42	8,27	
25/07/2011	8,70	7,81	7,64	
26/07/2011	8,38	8,10	8,26	
27/07/2011	8,80	8,34	8,43	
28/07/2011	8,81	8,27	8,24	
29/07/2011	8,84	8,20	8,21	
01/08/2011	8,64	8,13	8,19	TRH _{4.1} (E1) TRH _{4.2} (E2)
02/08/2011	8,66	8,59	8,49	
03/08/2011	8,83	8,27	8,24	
04/08/2011	9,02	8,50	8,48	
05/08/2011	8,98	8,21	8,23	
08/08/2011	7,34	7,67	7,62	
09/08/2011	8,86	7,64	7,62	
10/08/2011	8,92	7,66	7,74	
11/08/2011	8,91	8,21	8,19	TRH _{5.1} (E1) TRH _{5.2} (E2)
12/08/2011	8,97	8,19	8,21	
16/08/2011	8,77	7,92	8,04	
17/08/2011	8,86	7,95	7,99	
18/08/2011	8,50	7,92	7,88	
19/08/2011	8,44	8,18	8,12	
22/08/2011	8,27	7,90	7,89	
23/08/2011	8,58	7,73	7,80	
24/08/2011	RECESO			TRH _{6.1} (E1) TRH _{6.2} (E2)
05/09/2011	RECESO			
06/09/2011	8,92	7,81	7,63	
07/09/2011	8,50	7,82	7,79	
08/09/2011	8,78	7,88	7,80	
09/09/2011	8,76	7,83	7,82	
10/09/2011	7,91	7,96	7,96	
13/09/2011	8,83	7,83	7,78	
14/09/2011	7,00	7,91	7,90	
15/09/2011	8,49	8,07	8,08	
16/09/2011	8,87	8,23	8,12	
17/09/2011	8,96	8,11	8,06	

FECHA	pH			TRH
	Afluente (Sist PTAR)	E1 (UASB 1)	E2 (UASB 2)	
20/09/2011	8,46	7,83	7,81	TRH _{6.1} (E1)
21/09/2011	8,46	7,81	7,83	
22/09/2011	7,59	7,38	7,41	
24/09/2011	7,62	7,50	7,56	TRH _{7.0} (E2)
26/09/2011	8,04	7,67	7,46	TRH ₈ (E1) TRH ₉ (E2)
27/09/2011	8,85	7,89	8,03	
28/09/2011	8,84	8,30	8,21	
29/09/2011	8,81	7,73	7,67	
30/09/2011	8,58	7,73	7,72	
01/10/2011	8,83	8,13	8,05	
24/10/2011	7,25	7,53	7,42	TRH _{10.1} (E1) TRH _{10.2} (E2)
26/10/2011	7,60	7,58	7,47	
28/10/2011	7,07	7,54	7,59	
31/10/2011	7,60	7,49	7,53	
02/11/2011	8,17	7,42	7,56	
04/11/2011	8,58	7,52	7,60	

Anexo 7. Resultados de laboratorio – Compilación de Alcalinidad Parcial (AP) y Alcalinidad Intermedia (AI) en mg/L de CaCO₃ y su interrelación (AI/AP) en diversas programaciones (TRH).

FECHA	Afluente (Sist RAP)			E1 (UASB 1)			E2 (UASB 2)			TRH
	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	
13/06/2011	377	227	0,60	484,0	201	0,42	452	136	0,30	TRH _{1.1} (E1) TRH _{1.2} (E2)
14/06/2011	310	194	0,63	441,0	101	0,23	398	159	0,40	
15/06/2011	337	92	0,27	359,0	175	0,49	350	185	0,53	
16/06/2011	425	203	0,48	420,0	113	0,27	464	90	0,19	
17/06/2011	504	168	0,33	385,0	169	0,44	387	154	0,40	
20/06/2011	246	156	0,63	386,0	165	0,51	355	161	0,45	
21/06/2011	346	152	0,44	302,0	153	0,51	323	139	0,43	
22/06/2011	375	158	0,42	321,0	170	0,53	345	160	0,46	
23/06/2011	368	190	0,52	365,0	145	0,40	363	159	0,44	
24/06/2011	414	186	0,45	348,0	220	0,63	337	251	0,74	
27/06/2011	333	150	0,45	327,0	145	0,44	354	181	0,51	
28/06/2011	364	179	0,49	347,0	136	0,39	330	164	0,50	
29/06/2011	336	157	0,47	358,0	156	0,44	294	124	0,42	
30/06/2011	321	157	0,49	371,0	146	0,39	404	106	0,26	
01/07/2011	236	154	0,65	303,0	168	0,55	324	198	0,61	
05/07/2011	97	33	0,34	292,0	100	0,34	281	82	0,29	

FECHA	Afluente (Sist PTAR)			E1 (UASB 1)			E2 (UASB 2)			TRH
	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	
14/07/2011	136	87	0,64	171	133	0,78	184	129	0,70	TRH _{2.1} (E1) TRH _{2.2} (E2)
15/07/2011	54	51	0,94	107	143	1,34	113	103	0,91	
18/07/2011	172	150	0,87	153	133	0,87	180	128	0,71	
19/07/2011	642	214	0,33	302	218	0,72	362	114	0,31	
20/07/2011	514	212	0,41	286	225	0,79	297	216	0,73	
21/07/2011	137	107	0,78	211	155	0,73	226	142	0,63	
22/07/2011	351	121	0,34	450	155	0,34	463	149	0,32	TRH _{3.1} (E1) TRH _{3.2} (E2)
25/07/2011	382	130	0,34	312	106	0,34	332	102	0,31	
26/07/2011	212	69	0,33	474	141	0,3	467	129	0,28	
27/07/2011	402	111	0,28	528	124	0,23	539	128	0,24	
28/07/2011	280	72	0,26	419	95	0,23	427	77	0,18	
29/07/2011	402	151	0,38	469	154	0,33	506	146	0,29	
01/08/2011	319	88	0,28	501	110	0,22	499	100	0,2	TRH _{4.1} (E1) TRH _{4.2} (E2)
02/08/2011	381	108	0,28	656	129	0,20	633	114	0,18	
03/08/2011	392	106	0,27	567	163	0,29	596	174	0,29	
04/08/2011	507	119	0,23	576	158	0,27	586	142	0,24	
05/08/2011	422	105	0,25	464	172	0,37	477	145	0,30	
08/08/2011	420	108	0,26	372	104	0,28	413	121	0,29	
09/08/2011	378	103	0,27	365	134	0,37	378	126	0,33	
10/08/2011	510	141	0,28	319	121	0,38	376	108	0,29	
11/08/2011	460	102	0,22	530	107	0,2	526	98	0,19	TRH _{5.1} (E1) TRH _{5.2} (E2)
12/08/2011	426	99	0,23	542	98	0,18	529	109	0,21	
16/08/2011	304	74	0,24	443	85	0,19	458	74	0,16	
17/08/2011	390	95	0,24	540	90	0,17	535	75	0,14	
18/08/2011	390	95	0,24	475	115	0,24	435	120	0,28	
19/08/2011	325	120	0,37	595	100	0,17	565	165	0,29	
22/08/2011	210	70	0,33	720	165	0,23	640	155	0,24	
23/08/2011	290	110	0,38	390	135	0,35	440	125	0,28	
24/08/2011	RECESO									
05/09/2011	RECESO									
06/09/2011	380	150	0,39	520	155	0,3	525	145	0,28	TRH _{6.1} (E1) TRH _{6.2} (E2)
07/09/2011	575	135	0,23	540	130	0,24	485	125	0,26	
08/09/2011	630	180	0,29	550	135	0,25	535	155	0,29	
09/09/2011	440	100	0,23	570	125	0,22	510	157	0,31	
10/09/2011	510	135	0,26	595	155	0,26	590	130	0,22	
13/09/2011	451	124	0,27	530	115	0,22	570	100	0,18	
14/09/2011	470	135	0,29	525	145	0,28	532	133	0,25	
15/09/2011	420	115	0,27	630	170	0,27	640	175	0,27	
16/09/2011	515	125	0,24	780	165	0,21	725	205	0,28	
17/09/2011	685	135	0,2	620	150	0,24	585	157	0,27	

FECHA	Afluyente (Sistema PTAR)			E1 (UASB 1)			E2 (UASB 2)			TRH
	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	5,75 (AP)	4,30 (AI)	AI/AP	
20/09/2011	622,5	178,0	0,29	645,0	155,0	0,24	622,5	118,0	0,19	TRH _{6.1} (E1) TRH _{7.0} (E2)
21/09/2011	622,5	178,0	0,29	622,5	118,0	0,19	645,0	155,0	0,24	
22/09/2011	355,0	115,0	0,32	440,0	120,0	0,27	437,5	130,0	0,30	
24/09/2011	372,5	138,0	0,37	440,0	125,0	0,28	462,5	125,0	0,27	
26/09/2011	365,0	150,0	0,41	505,0	140,0	0,28	445,0	115,0	0,26	TRH ₈ (E1) TRH ₉ (E2)
27/09/2011	685,0	192,5	0,28	630,0	180,0	0,29	670,0	170,0	0,25	
28/09/2011	620,0	175,0	0,28	690,0	170,0	0,25	675,0	195,0	0,29	
29/09/2011	825,0	240,0	0,29	650,0	120,0	0,18	670,0	140,0	0,21	
30/09/2011	770,0	165,0	0,21	685,0	135,0	0,20	675,0	165,0	0,24	
01/10/2011	670,0	160,0	0,24	780,0	195,0	0,25	780,0	195,0	0,25	
24/10/2011	382,5	192,5	0,50	570,0	137,5	0,24	510,0	137,5	0,27	TRH _{10.1} (E1) TRH _{10.2} (E2)
26/10/2011	272,5	135,0	0,50	542,5	150,0	0,28	497,5	137,5	0,28	
28/10/2011	297,5	200,0	0,67	515,0	142,5	0,28	557,5	147,5	0,26	
31/10/2011	262,5	130,0	0,50	552,5	142,5	0,26	500,0	135,0	0,27	
02/11/2011	547,5	225,0	0,41	552,5	165,0	0,30	535,0	150,0	0,28	
04/11/2011	537,5	162,5	0,30	587,5	172,5	0,29	565,0	187,5	0,33	

Anexo 8. Resultados de laboratorio – Compilación de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) en diversas programaciones (TRH).

FECHA	Ácidos Grasos Volátiles (meq/L)			TRH
	Afluyente (Sist PTAR)	E1 (UASB 1)	E2 (UASB 2)	
06/09/2011	0,00267	0,00230	0,00232	TRH _{6.1} (E1) TRH _{6.2} (E2)
07/09/2011	0,00160	0,00120	0,00110	
08/09/2011	0,00190	0,00120	0,00140	
09/09/2011	0,00145	0,00120	0,00125	
10/09/2011	0,00170	0,00135	0,00140	
21/09/2011	0,00165	0,00060	0,00128	TRH _{6.1} (E1) TRH _{7.0} (E2)
22/09/2011	0,00130	0,00075	0,00090	
24/09/2011	0,00135	0,00100	0,00097	
26/09/2011	0,00185	0,00130	0,00105	TRH ₈ (E1) TRH ₉ (E2)
27/09/2011	0,00265	0,00133	0,00128	
28/09/2011	0,00200	0,00110	0,00130	
29/09/2011	0,00266	0,00110	0,00115	
30/09/2011	0,00163	0,00130	0,00135	
01/10/2011	0,00180	0,00115	0,00140	
24/10/2011	0,00200	0,00095	0,00090	TRH _{10.1} (E1) TRH _{10.2} (E2)
26/10/2011	0,00155	0,00085	0,00093	
28/10/2011	0,00195	0,00095	0,00087	
31/10/2011	0,00133	0,00083	0,00088	
02/11/2011	0,00208	0,00095	0,00090	
04/11/2011	0,00145	0,00100	0,00115	

Anexo 9. Resultados de laboratorio – Compilación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en diversas programaciones (TRH).

FECHA	DQO (mg/L O ₂)					TRH
	Afluente (Sist RAP)	E1	E1 remoción	E2	E2 remoción	
15/06/2011	224,00	252,80	-12,86%	193,28	13,71%	TRH _{1.1} (E1) TRH _{1.2} (E2)
17/06/2011	323,84	173,44	46,44%	270,08	16,60%	
20/06/2011	128,00	100,80	21,25%	184,32	-44,00%	
22/06/2011	173,76	236,80	-36,28%	271,36	-56,17%	
24/06/2011	289,92	291,84	-0,66%	355,84	-22,74%	
29/06/2011	512,00	310,40	39,38%	288,00	43,75%	

FECHA	Afluente (Sist PTAR)	E1	E1 remoción	E2	E2 remoción	TRH
15/07/2011	384,64	248,32	35,44%	285,44	25,79%	TRH _{2.1} (E1)
20/07/2011	488,32	352,00	27,92%	389,12	20,31%	TRH _{2.2} (E2)
22/07/2011	713,60	355,20	50,22%	529,60	25,78%	TRH _{3.1} (E1) TRH _{3.2} (E2)
27/07/2011	931,20	281,60	69,76%	422,40	54,64%	
29/07/2011	944,00	422,40	55,25%	392,00	58,47%	TRH _{4.1} (E1) TRH _{4.2} (E2)
05/08/2011	924,80	443,52	52,04%	416,00	55,02%	
08/08/2011	1206,40	480,00	60,21%	611,20	49,34%	TRH _{4.1} (E1) TRH _{4.2} (E2)
10/08/2011	876,80	393,60	55,11%	409,60	53,28%	
12/08/2011	873,60	396,80	54,58%	318,40	63,55%	TRH _{5.1} (E1)
17/08/2011	1062,40	473,60	55,42%	390,40	63,25%	TRH _{5.2} (E2)
21/09/2011	440,00	256,00	41,82%	256,00	41,82%	TRH _{6.1} (E1) TRH _{7.0} (E2)
22/09/2011	440,00	168,00	61,82%	112,00	74,55%	
24/09/2011	643,25	257,30	60,00%	271,31	57,82%	TRH ₈ (E1) TRH ₉ (E2)
26/09/2011	923,54	302,85	67,21%	257,30	72,14%	
27/09/2011	704,57	334,38	52,54%	330,88	53,04%	
28/09/2011	660,77	376,43	43,03%	330,88	49,93%	
29/09/2011	722,09	323,87	55,15%	295,84	59,03%	
30/09/2011	748,36	257,30	65,62%	365,91	51,10%	
01/10/2011	792,16	365,91	53,81%	411,46	48,06%	
24/10/2011	1282,66	201,24	84,31%	260,81	79,67%	TRH _{10.1} (E1) TRH _{10.2} (E2)
26/10/2011	1046,17	183,73	82,44%	211,75	79,76%	
28/10/2011	897,27	194,24	78,35%	208,24	76,79%	
31/10/2011	687,05	246,79	64,08%	278,07	59,53%	
02/11/2011	2211,12	292,34	86,78%	236,25	89,32%	
04/11/2011	1107,48	386,94	65,06%	323,87	70,76%	

Anexo 10. Resultados de laboratorio – Compilación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) en programaciones iniciales (TRH).

FECHA	DBO ₅ (mg/L O ₂)					TRH
	Afluyente (Sist RAP)	E1	E1 remoción	E2	E2 remoción	
15/06/2011	77,06	62,11	19,40%	62,11	19,40%	TRH _{1.1} (E1)
17/06/2011	102,03	87,93	13,82%	89,55	12,23%	TRH _{1.2} (E2)

Fecha	Afluyente (Sist PTAR)	E1	E1 remoción	E2	E2 remoción	TRH
18/07/2011	239,81	84,30	64,87%	125,80	47,54%	TRH _{2.1} (E1) TRH _{2.2} (E2)
22/07/2011	160,80	145,60	9,43%	166,30	-3,42%	TRH _{3.1} (E1)
29/07/2011	452,78	142,70	68,49%	168,30	62,83%	TRH _{3.2} (E2)
17/08/2011	382,07	91,10	76,15%	105,16	72,48%	TRH _{5.1} (E1) TRH _{5.2} (E2)

Anexo 11. Resultados de laboratorio – Compilación de los Solidos Totales (ST) y Solidos Totales Volátiles (STV) y su interrelación (STV/ST) en distintas programaciones (TRH).

FECHA	Afluyente (Sist PTAR)			E1					E2					TRH
	ST (mg/L)	STV (mg/L)	Relación STV/ST	ST (mg/L)	Remoc ST	STV (mg/L)	Remoc STV	Relación STV/ST	ST (mg/L)	Remoc ST	STV (mg/L)	Remoc STV	Relación STV/ST	
29/07/2011	1336,0	738,0	0,55	718,0	46%	270,0	63%	0,38	880,0	34%	374,0	49%	0,43	TRH _{3.1} (E1) TRH _{3.2} (E2)
08/08/2011	792,0	512,0	0,65	724,0	9%	284,0	45%	0,39	964,0	-22%	508,0	1%	0,53	TRH _{4.1} (E1)
10/08/2011	1156,0	536,0	0,46	638,0	45%	288,0	46%	0,45	606,0	48%	252,0	53%	0,42	TRH _{4.2} (E2)
17/08/2011	1524,0	934,0	0,61	832,0	45%	326,0	65%	0,39	770,0	49%	318,0	66%	0,41	TRH _{5.1} (E1) TRH _{5.2} (E2)

FECHA	A PTAR			E1					E2					TRH
	ST	STV	Relación STV/ST	ST	Remoc ST	STV	Remoc STV	Relación STV/ST	ST	Remoc ST	STV	Remoc STV	Relación STV/ST	
24/09/2011	953,0	503,0	0,53	856,0	10,18%	363,0	27,83%	0,42	653,8	31,40%	88,9	82,33%	0,14	TRH _{6.1} (E1) TRH _{7.0} (E2)
26/09/2011	930,4	517,0	0,56	652,0	29,92%	121,0	76,60%	0,19	529,0	43,14%	54,0	89,56%	0,10	TRH ₈ (E1) TRH ₉ (E2)
27/09/2011	967,0	357,0	0,37	665,0	31,23%	130,0	63,59%	0,20	884,0	8,58%	363,0	-1,68%	0,41	
28/09/2011	1153,0	503,0	0,44	772,4	33,01%	204,5	59,34%	0,26	960,0	16,74%	335,0	33,40%	0,35	
29/09/2011	1029,0	473,0	0,46	808,0	21,48%	263,0	44,40%	0,33	731,0	28,96%	287,0	39,32%	0,39	
30/09/2011	1299,0	690,0	0,53	749,0	42,34%	217,0	68,55%	0,29	793,0	38,95%	313,0	54,64%	0,39	
01/10/2011	1107,0	596,0	0,54	848,3	23,37%	390,7	34,45%	0,46	867,0	21,68%	425,0	28,69%	0,49	TRH _{10.1} (E1) TRH _{10.2} (E2)
24/10/2011	1349,0	833,0	0,62	595,0	55,89%	200,0	75,99%	0,34	670,0	50,33%	294,0	64,71%	0,44	
26/10/2011	754,2	356,7	0,47	665,0	11,83%	245,0	31,31%	0,37	685,0	9,18%	271,0	24,03%	0,40	
28/10/2011	874,0	456,0	0,52	615,0	29,63%	204,0	55,26%	0,33	618,4	29,24%	188,7	58,62%	0,31	
31/10/2011	765,0	391,0	0,51	734,0	4,05%	243,4	37,75%	0,33	733,0	4,18%	313,0	19,95%	0,43	
02/11/2011	1923,0	1148,0	0,60	820,0	57,36%	339,0	70,47%	0,41	703,4	63,42%	269,5	76,52%	0,38	
04/11/2011	1152,0	607,0	0,53	875,0	24,05%	325,7	46,34%	0,37	722,0	37,33%	253,0	58,32%	0,35	

Anexo 12. Resultados de laboratorio – Compilación de Fosforo Total en distintas programaciones (TRH).

FECHA	Fosforo Total (mg/L P-PO ₄)					TRH
	Afluente (Sist PTAR)	E1	E1 remoción	E2	E2 remoción	
18/07/2011	9,58	20,29	-111,81%	21,72	-126,82%	TRH _{2,1} (E1)
20/07/2011	39,50	38,00	3,80%	39,50	0,00%	TRH _{2,2} (E2)
27/07/2011	31,56	33,22	-5,25%	33,32	-5,59%	TRH _{3,1} (E1)
29/07/2011	37,55	30,77	18,06%	30,66	18,34%	TRH _{3,2} (E2)
02/08/2011	33,50	52,15	-55,68%	55,61	-66,01%	TRH _{4,1} (E1) TRH _{4,2} (E2)
05/08/2011	58,50	43,50	25,64%	47,00	19,66%	
08/08/2011	26,50	43,00	-62,26%	39,00	-47,17%	
10/08/2011	50,00	28,50	43,00%	29,00	42,00%	TRH _{5,1} (E1) TRH _{5,2} (E2)
12/08/2011	46,00	36,50	20,65%	41,00	10,87%	
17/08/2011	46,00	34,00	26,09%	41,50	9,78%	
19/08/2011	36,00	45,00	-25,00%	44,00	-22,22%	

Anexo 13. Resultados de laboratorio – Nitrógeno Total Kjeldahl.

FECHA	NTK (mg/L)						TRH
	Patrón	Afluente (Sist PTAR)	E1	E1 remoción	E2	E2 remoción	
29/07/2011	249,40	188,16	146,16	22,32%	-2,24	101,19%	TRH _{3,1} (E1) TRH _{3,2} (E2)
05/08/2011	277,20	208,32	169,12	18,82%	181,72	12,77%	TRH _{4,1} (E1) TRH _{4,2} (E2)
12/08/2011		135,00	148,00	-9,63%	16,50	87,78%	TRH _{5,1} (E1)
17/08/2011		299,00	135,20	54,78%	152,80	48,90%	TRH _{5,2} (E2)