EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN LA MODALIDAD DE ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO SIN CLARIFICACIÓN PRIMARIA TRATANDO AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Trabajo de investigación para optar al título de
Magister en Ingeniería: *Área de énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental*

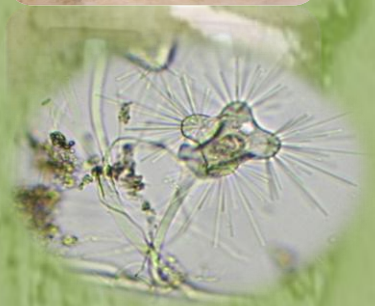


Presentado por:
TATIANA MAÑUNGA
Ing. Sanitaria
Universidad del Valle

Directora de Tesis:
JENNY ALEXANDRA RODRÍGUEZ VICTORIA
Ing. Sanitaria, Dra
Universidad del Valle







Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente
Posgrado en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Santiago de Cali

2012

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN LA MODALIDAD DE ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO SIN CLARIFICACIÓN PRIMARIA TRATANDO AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

TATIANA MAÑUNGA
Ing. Sanitaria
Universidad del Valle

Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente

Posgrado en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Santiago de Cali

2012

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN LA MODALIDAD DE ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO SIN CLARIFICACIÓN PRIMARIA TRATANDO AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Trabajo de investigación para optar al título de

Magister en Ingeniería: *Área de énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental*

Presentado por:

TATIANA MAÑUNGA
Ing. Sanitaria
Universidad del Valle

Directora de Tesis:

JENNY ALEXANDRA RODRÍGUEZ VICTORIA
Ing. Sanitaria, Dra
Universidad del Valle

Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente

Posgrado en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Santiago de Cali

2012

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

Dra. JENNY ALEXANDRA RODRÍGUEZ VICTORIA
Directora de Tesis

_____
Firma del Jurado

_____
Firma del Jurado

Santiago de Cali, Marzo de 2012

DEDICATORIA

A mi Madre Delfa Marina por su apoyo constante
A mis Hermanas Ana Silvia y Yoan Catalina por su paciencia y comprensión
A mi Sobrino Juan David por su sonrisa todos los días
A mi abuelita que desde el cielo me sigue protegiendo

A mis amigos Alex, Tere y Yele gracias por seguir siendo los mejores amigos, herman@s del alma "ATAYER".

A mis compañeros Duvan y Alex Mauricio con quienes compartí este camino y más allá de las lecciones aprendidas quedo una amistad invaluable.

No corras ni te detengas...
que tu paso por la vida sea normal, seguro, confiado

No corras ni te detengas...
lleva más bien un ritmo de progreso y esperanza.

Camina con otros,
comparte pero no pierdas de vista la meta que quieres alcanzar.
Dios marcha a tu lado como peregrino y amigo.

No te desanimes...
Si el camino es largo si no te paras: ¡Llegarás!
Porque ya lo dijo un gran pensador:
No temas ir despacio, teme no avanzar.
Anónimo

A Dios que es vida gracias por permitirme recorrer este camino.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora **Ing. Dra. Jenny A. Rodríguez Victoria** por la confianza depositada, su constante apoyo, colaboración y paciencia durante la dirección de esta investigación.

A la profesora **Ing. PhD. Patricia Torres** por su apoyo constante e interés en la culminación exitosa de esta investigación.

A la **Ing. MSc. Nancy Vásquez Sarria** por su apoyo incondicional, por su asesoría en todo momento durante el desarrollo de esta investigación y en especial por su amistad.

A la **Bióloga Yolima Rueda** por su participación oportuna en la identificación de los microorganismos durante la fase experimental.

Al **Tec**. **Andrés Buenaventura Arturo** por su importante colaboración y compromiso en la realización de los análisis de laboratorio.

A los tesistas **Alejandro Rodas Padilla, Minakshi Brand Torres, Cristian David Cárdenas Urbano y John Albert Bermúdez Arroyo,** hoy excelentes ingenieros, por su importante participación y colaboración durante la fase experimental de esta investigación.

A los operadores de la planta piloto **Yeferson Vásquez y Edward Henao** por su colaboración oportuna durante la fase experimental.

A **EMCALI EICE ESP** por financiar esta investigación y facilitar su infraestructura para el desarrollo de la misma.

Al personal de operación y mantenimiento de la PTAR-C, en especial a la **Ing. MSc. Luz Helena Mora, Qca. Alexandra Lucero, Profesional Nelson Castro y Profesional Wilson Franco** quienes nos brindaron su apoyo y colaboración oportuna durante la fase experimental.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 15

2 OBJETIVOS 17

2.1 OBJETIVO GENERAL 17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

3 MARCO REFERENCIAL 18

3.1 SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN LA MODALIDAD DE ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO (SLAEC) 18
3.1.1 Capacidad de bioadsorción 19
3.1.2 Variables de operación y control 20
3.1.3 Microbiología del proceso de lodos activados 24
3.2 SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA EN EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS 26
3.2.1 Sedimentabilidad del lodo activado 26
3.2.2 Producción de lodos 29
3.3 CLARIFICACIÓN PRIMARIA DEL AGUA RESIDUAL 30
3.4 APLICACIONES DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS 32
3.4.1 Sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto-(SLAEC) 32
3.4.2 Sistemas de lodos activados sin clarificación primaria 35
3.4.3 Modificaciones del SLAEC 37
3.5 CONSIDERACIONES FINALES 38

4 MATERIALES Y MÉTODOS 39

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO 39
4.2 UNIDAD EXPERIMENTAL 39
4.2.1 Agua residual afluente a la planta piloto 39
4.2.2 Descripción de la planta piloto 40
4.2.3 Desarenador de la planta piloto 41
4.2.4 Clarificador primario de la planta piloto 42
4.2.5 Reactor de Contacto (RC) 42
4.2.6 Sedimentador Secundario (SS) 43
4.2.7 Purga y recirculación de lodo secundario 44
4.2.8 Reactor de Estabilización (RE) 45
4.3 FASES DE EVALUACIÓN 46
4.4 SEGUIMIENTO Y CONTROL OPERACIONAL DEL SISTEMA 48
4.4.1 Parámetros operacionales 48
4.4.2 Variables de control y desempeño del sistema 49
4.4.3 Puntos de muestreo y toma de muestra 49
4.4.4 Caracterización microscópica 52
4.4.5 Evaluación de la calidad y cantidad de lodo generado 53

4.5 ESTRATEGIA DE ARRANQUE 54
4.5.1 Inoculación 54
4.5.2 Puesta en marcha 55
4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS 56
4.6.1 Análisis del comportamiento de las variables fisicoquímicas, de control y desempeño del sistema en cada Fase 56
4.6.2 Comparación de las Fases 57
4.6.3 Análisis del efecto que tiene la ausencia de la clarificación primaria sobre las características de sedimentabilidad del lodo secundario y producción de sólidos 59

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 60

5.1 COMPOSICIÓN DEL ARd Y EP 60
5.1.1 Muestreo horario 60
5.1.2 Muestreo puntual 63
5.2 DESEMPEÑO DEL SISTEMA 72
5.2.1 Variables operacionales 72
5.2.2 Variables fisicoquímicas del ES 83
5.3 CARACTERÍSTICAS DE SEDIMENTABILIDAD Y PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS 90
5.3.1 Características de sedimentabilidad 90
5.3.2 Producción de sólidos 93
5.4 MICROSCOPIA 95

6 CONCLUSIONES 100

7 BIBLIOGRAFÍA 102

8 ANEXOS 109

8.1 DATOS DE CAMPO 109
8.1.1 Muestreo horario 109
8.1.2 Muestreo puntual 111
8.1.3 Características de sedimentabilidad del lodo secundario 123
8.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO 137

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Microorganismos indicadores del desempeño del SLA 25
Tabla 3.2 Valores de los coeficientes v_o y k (constantes de Vesilind) 28
Tabla 3.3 Rangos y valores típicos de IVL e IVLD 29
Tabla 3.4. Producción de lodo de exceso en Sistemas de Lodos Activados 30
Tabla 4.1 Dimensiones de las unidades de la planta piloto 41
Tabla 4.2 Condiciones operacionales 48
Tabla 4.3. Variables fisicoquímicas para el control del sistema 49
Tabla 4.4 Variables fisicoquímicas para medir el desempeño del sistema 49
Tabla 4.5 Variables fisicoquímicas determinadas en los muestreos de variación horaria 53

Tabla 4.6 Variables fisicoquímicas para establecer la calidad del lodo generado 53
Tabla 4.7 Caracterización del inoculo 54
Tabla 5.1 Resumen estadístico de las características del ARd y EP 63
Tabla 5.2 Resumen estadístico otras características del ARd y EP 69
Tabla 5.3 Resumen estadístico de las variables operacionales 72
Tabla 5.4 Resumen estadístico de las características del ES 83

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Diagrama de Flujo del SLAEC 19
Figura 3.2 Equipo de White para determinar la VSZ y una curva típica de la interfase sobrenadante – lodo 27
Figura 4.1 Ubicación geográfica del proyecto 39
Figura 4.2 Flujo de toma y conducción del agua residual afluente a la planta piloto 40
Figura 4.3 Dispositivos para remover sólidos gruesos del agua residual antes del ingreso a la planta piloto 40
Figura 4.4 Esquema de la distribución de las unidades de la planta piloto 41
Figura 4.5 Desarenadores de la planta piloto 42
Figura 4.6 Clarificador primario 42
Figura 4.7 Reactor de Contacto 43
Figura 4.8 Sedimentador Secundario 44
Figura 4.9 Purga de lodo secundario 45
Figura 4.10 Reactor de Estabilización 46
Figura 4.11 Flujo del agua residual desarenada (ARd) durante las fases de experimentación 47
Figura 4.12 Diagrama de flujo de la planta piloto 47
Figura 4.13 Punto de muestreo 1. AR afluente al sistema biológico 50
Figura 4.14 Punto de muestreo 3. Efluente Secundario 50
Figura 4.15 Punto de muestreo 4 y 5. Licor Mixto 51
Figura 4.16 Punto de muestreo 6. Purga principal 51
Figura 4.17 Recolección de muestra 10. Recirculación de lodo 52
Figura 4.18 Observación microscópica del inóculo 55
Figura 4.19 Representación del box-plot 57
Figura 5.1 Variación horaria del pH 60
Figura 5.2 Variación horaria de la Alcalinidad Total 61
Figura 5.3 Variación horaria de la DQO_T 62
Figura 5.4 Variación horaria de los SST 62
Figura 5.5 pH del ARd y EP 63
Figura 5.6 Alcalinidad Total del ARd y EP 64
Figura 5.7 DQO Total del ARd y EP 66
Figura 5.8 Relación DQO_F / DQO_T 67
Figura 5.9 DBO_5 Total del ARd y EP 67
Figura 5.10 SST del ARd y EP 68
Figura 5.11 Evidencia de la acumulación de G/A en el sistema biológico en la Fase I 70
Figura 5.12 Evidencia presencia de detergentes en el RC Fase I 71
Figura 5.13 Factor α 73
Figura 5.14 Tiempo de Retención Celular (TRC) 74
Figura 5.15 Oxígeno Disuelto 75
Figura 5.16 Temperatura del licor mixto 76
Figura 5.17 Sólidos Suspendidos Volátiles en Licor Mixto del RC 76
Figura 5.18 Sólidos Volátiles en la recirculación de lodo 77
Figura 5.19 Sólidos Suspendidos Volátiles en Licor Mixto del RE 79
Figura 5.20 Sólidos Volátiles en el lodo de purga 80
Figura 5.21 Presencia de filamentos en el RC 80
Figura 5.22 Relación A/M 81

Figura 5.23 Carga Orgánica Volumétrica 82
Figura 5.24 pH del ES 84
Figura 5.25 pH del licor mixto 84
Figura 5.26 Alcalinidad total del ES 85
Figura 5.27 DQO total del ES 86
Figura 5.28 DBO_5 total del ES 86
Figura 5.29 SST del ES 87
Figura 5.30 Eficiencia de reducción de DQO, DBO5 y SST en el SLAEC 89
Figura 5.31 Índice Volumétrico de Lodos (IVL) 90
Figura 5.32 Características microscópicas del floc biológico en el RC 91
Figura 5.33 Características microscópicas del floc biológico en el RE 92
Figura 5.34 Índice Volumétrico de Lodos Diluido (IVLD) 92
Figura 5.35 Constantes de Vesilind 93
Figura 5.36 Producción de sólidos 94
Figura 5.37 Carga de sólidos purgados 95
Figura 5.38 Distribución porcentual del los grupos de microorganismos identificados en el licor mixto 96
Figura 5.39 Microorganismos identificados en el Reactor de Contacto 96
Figura 5.40 Microorganismos identificados en el Reactor de Estabilización 98

LISTA DE ANEXOS

Anexo 8.1. 1 Variables Fisicoquímicas del ARd – muestreo horario 109
Anexo 8.1. 2 Variables Fisicoquímicas del EP - muestreo horario 110
Anexo 8.1. 3 Variables fisicoquímicas del ARd Fase I - muestreo puntual 111
Anexo 8.1. 4 Variables Fisicoquímicas del ARd Fase II - muestreo puntual 113
Anexo 8.1. 5 Variables Fisicoquímicas del EP Fase II - muestreo puntual 114
Anexo 8.1. 6 Variables Operativas Fase I y II- muestreo puntual 115
Anexo 8.1. 7 SST y SSV en el lodo secundario Fase I - muestreo puntual 118
Anexo 8.1. 8 SST y SSV en el lodo secundario Fase I - muestreo puntual 120
Anexo 8.1. 9 Variables Fisicoquímicas del ES Fase I y II - muestreo puntual 121
Anexo 8.1. 10 Índice Volumétrico de Lodos (IVL) 123
Anexo 8.1. 11 Índice Volumétrico de Lodos Diluido (IVLD) 124
Anexo 8.1. 12 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase I 126
Anexo 8.1. 13 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase II 129
Anexo 8.1. 14 Resumen de las constantes de Vesilind 134
Anexo 8.1.15 Microorganismos observados en la Fase I 135
Anexo 8.1.16 Microorganismos observados en la Fase II 136

Anexo 8.2. 1 ANOVA pH DEL ARd Fase I, ARd Fase II y EP 137
Anexo 8.2. 2 ANOVA Alcalinidad Total del ARd Fase I, ARd Fase II y EP 138
Anexo 8.2. 3 ANOVA DQO Total del ARd Fase I, ARd Fase II y EP 139
Anexo 8.2. 4 ANOVA DBO_5 Total del ARd Fase I, ARd Fase II y EP 140
Anexo 8.2. 5 Test de Normalidad para DBO_5 Total del ARd Fase II y EP 141
Anexo 8.2. 6 ANOVA SST del ARd Fase I, ARd Fase II y EP 142
Anexo 8.2. 7 Prueba-t de dos muestras para el Factor α de la Fase I y Fase II 143
Anexo 8.2. 8 Prueba-t de dos muestras para el TRC de la Fase I y Fase II 144
Anexo 8.2. 9 Prueba-t de dos muestras para el OD del RC de la Fase I y Fase II 145
Anexo 8.2. 10 Prueba-t de dos muestras para el OD del RE de la Fase I y Fase II 146
Anexo 8.2. 11 Prueba-t de dos muestras para la Temperatura del licor mixto del RC de la Fase I y Fase II 147
Anexo 8.2. 12 Prueba-t de dos muestras para la Temperatura del licor mixto del RE de la Fase I y Fase II 148
Anexo 8.2. 13 Prueba-t de dos muestras para el SSVLM RC de la Fase I y Fase II 149
Anexo 8.2. 14 Prueba-t de dos muestras para el SSVLM RE de la Fase I y Fase II 150

Anexo 8.2. 15 Prueba-t de dos muestras para el SSVLM en la recirculación de lodo de la Fase I y Fase II 151
Anexo 8.2. 16 ANOVA SV en el lodo de purga de la fase i y fase II 152
Anexo 8.2. 17 Prueba-t de dos muestras para pH del ES de la Fase I y Fase II..... 153
Anexo 8.2. 18 Prueba-t de dos muestras para la Alcalinidad Total del ES de la Fase I y Fase II..... 154
Anexo 8.2. 19 Prueba-t de dos muestras para la DQO total del ES de la Fase I y Fase II 155
Anexo 8.2. 20 Prueba-t de dos muestras para la DBO_5 total del ES de la Fase I y Fase II..... 156
Anexo 8.2. 21 Prueba-t de dos muestras para SST total del ES de la Fase I y Fase II 157
Anexo 8.2. 22 ANOVA Porcentaje de Reducción de DQO, DBO_5 y SST en el SLAEC en la Fase I y Fase II 158
Anexo 8.2. 23 ANOVA para el IVL del licor mixto de RC y RE de la Fase I y Fase II 159
Anexo 8.2. 24 Prueba-t de dos muestras para IVLD de la Fase I y Fase II..... 160
Anexo 8.2. 25 Test de Normalidad para el IVLD del RC Fase I y Fase II 161
Anexo 8.2. 26 Prueba-t de dos muestras para la constante de Vesilind Vo de la Fase I y Fase II 162
Anexo 8.2. 27 Prueba-t de dos muestras para la constante de Vesilind k de la Fase I y Fase II 163
Anexo 8.2. 28 Prueba-t de dos muestras para el coeficiente de producción de lodos (Px) de la Fase I y Fase II..... 164

LISTADO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ALL:	Agua Lluvia
A/M:	Relación Alimento / Microorganismo
AR:	Agua Residual
ARD:	Agua Residual Doméstica
ARd:	Agua Residual Desarenada
ARM:	Agua Residual Municipal
COV:	Carga Orgánica Volumétrica
d:	Día (s)
DBO_5	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO:	Demanda Química de Oxígeno
EMCALI:	Empresas Municipales de Cali
EP:	Efluente Primario
ES:	Efluente Secundario
G/A:	Grasas y Aceites
IVL:	Índice Volumétrico de Lodos
IVLD:	Índice Volumétrico de Lodos Diluido
L:	Litro
g:	Gramo
m:	Metro
m^3:	Metro Cubico
mg:	Miligramo
mL:	Mililitro
MO	Materia Orgánica
OD:	Oxígeno Disuelto
PTAR:	Planta de Tratamiento de Agua Residual
PTAR-C:	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Cañaveralejo
Q:	Caudal
RC:	Reactor de Contacto
RE:	Reactor de Estabilización
SSed:	Sólidos Sedimentables
SLA:	Sistema de Lodos Activados
SLAEC:	Sistema de Lodos Activados en la Modalidad de Estabilización por Contacto
SPE:	Sustancias Poliméricas Extracelulares

Abreviatura	Significado
SST:	Sólidos Suspendidos Totales
SSV:	Sólidos Suspendidos Volátiles
SSVLM:	Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor Mixto
TRC:	Tiempo de Retención Celular
TRH:	Tiempo de Retención Hidráulico
VSZ:	Velocidad de Sedimentación Zonal
%R:	Porcentaje de recirculación de lodo

RESUMEN

Mañunga T. ***Evaluación del desempeño de un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto sin clarificación primaria tratando agua residual doméstica*** **(2011).** Maestría en Ingeniería: Área de énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Valle del Cauca - Colombia.

La configuración del Sistema de Lodos Activados en la Modalidad de Estabilización por Contacto (SLAEC) separa los principios de la cinética microbiana, para reducir en un corto periodo los contaminantes del agua residual (AR), constituyéndose está en su principal ventaja frente a las otras configuraciones de lodos activados y por la cual puede operar eficientemente en ausencia de la clarificación primaria de AR. Tomando en cuenta lo anterior y bajo condiciones estables de operación, se evaluó el desempeño del SLAEC sin clarificación primaria en el tratamiento de AR desarenada durante 114 d (Fase I), posteriormente se incluyó la clarificación primaria durante 69 d (Fase II) para comparar los efectos de este proceso sobre: *i) calidad del AR afluente al sistema biológico, ii) variables operacionales* y *iii) calidad del lodo secundario*. Esta investigación fue realizada a escala piloto en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua residual doméstica (PTAR-C), la cual trata el AR de la Ciudad de Cali. Las condiciones operacionales fueron iguales en las dos Fases por lo que la presencia ó ausencia de la clarificación primaria se constituyó en el único factor causal de las diferencias observadas. Estas condiciones fueron: Q: 0.726 $L.s^{-1}$, *Recirculación de lodos: 40%, TRC: 6 d,* $TRH_{RC\ neto}$*: 0,84 h,* $TRH_{RE\ neto}$*: 4.3 h, OD: 2.0* $mg.L^{-1}$*,* $SSVLM_{RC}$*: 1500 mg.L* y $SSVLM_{RE}$*: 3500* $mg.L^{-1}$. Los resultados mostraron que la composición de los afluentes al RC en cada fase (ARd Fase I y EP Fase II), presentaron diferencias en un nivel de significancia de 0.05, tal diferencia respondió al comportamiento esperado, debido a la inclusión de la clarificación primaria. Sin embargo, las concentraciones del sustrato en el EP no llegaron a ser inhibitorias para el desarrollo de la actividad microbiana. Las concentraciones de DQO, DBO_5 y SST en el ES de la Fase I y II fueron 54, 36 y 18 $mg.L^{-1}$ para la primera y 42, 26 y 20 $mg.L^{-1}$ en la segunda; la similitud en la calidad del ES de las dos Fases resultó posiblemente de un adecuado desempeño de los mecanismos de adsorción y entrampamiento de la MO soluble y particulada, así como de la capacidad de floc biológico para atrapar el material particulado orgánico e inorgánico. Sin embargo, el ingreso de sustancias potencialmente inhibitorias de la actividad microbiana como G/A y detergentes, producto de la ausencia una barrera de control, función que desempeñó la clarificación primaria durante la Fase II, resulto en una gran desventaja para el equilibrio y estabilidad del sistema, ya que las propiedades de bioflocculación del floc biológico fueron alteradas por este tipo de sustancias.

Palabras claves: *Tratamiento biológico, Agua residual doméstica, Lodos activados, Estabilización por contacto, clarificación primaria*

SUMMARY

Mañunga T. ***Performance evaluation of a contact stabilization activated sludge without clarification primary treating domestic wastewater (2011).*** Master in Engineering: Emphasis Area Sanitary and Environmental Engineering. Engineering School of Natural Resources and Environment. Faculty of Engineering, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Valle del Cauca - Colombia.

The contact stabilization activated sludge (CSAS) separates the principles of microbial kinetics for to reduce pollutants from wastewater in short period its becoming their main advantage over other configurations of activated sludge and which can operate efficiently in the absence of primary clarification. Light of the above and under stable operating conditions, we evaluated the performance of pilot-scale contact stabilization activated sludge without primary clarification for 114 d (Phase I), Subsequently, the primary clarification was included for 69 d (Phase II) to compare the effects of this process on the quality of the influent wastewater to the biological system, on operational variables and secondary sludge quality. This research was conducted in the facilities of Cañaveralejo Wastewater Treatment Plant Domestic of which treats wastewater from the city of Cali. The operating conditions were the same in the two phases so that the presence or absence of primary clarification was the only factor causing the observed differences. These conditions were: Q: 0726 Ls^{-1}, recirculation of sludge: 40%, Solids Retention Time (SRT): 6 d, Hydraulic Residence Time in Contact Reactor: 0.84 h, Hydraulic Residence Time in Stabilization Reactor: 4.3 h, DO: 2.0 $mg.L^{-1}$, VSS_{CR}: 1500 $mg.L^{-1}$ and VSS_{ER}: 3500 $mg.L^{-1}$. The results showed that the composition of the wastewater influent to the Contact Reactor in each phase (Phase I desanding wastewater and Phase II primary effluent) showed differences in a significance level of 0.05, this difference responded to the expected behavior due to the inclusion of primary clarification. However, the substrate concentrations in the primary effluent did not become inhibitory for the development of microbial activity. The concentrations of COD, BOD and TSS in the effluent of Phase I and II were 54, 36 and 18 $mg.L^{-1}$ for the first and 42, 26 and 20 $mg.L^{-1}$ in the second, the similarity in quality are the two phases was possibly adequate performance of the mechanisms of adsorption and entrapment of soluble and particulate organic matter as well as biological floc ability to trap organic and inorganic particulate material.However, income of potentially inhibitory to microbial activity as a grease and oils and detergents, due to the absence of a barrier control, role played by primary clarification during Phase II, resulted in a great disadvantage for balance and stability system, since the bioflocculation properties floc were altered by these substances.

Keywords: *Biological treatment, domestic wastewater, activated sludge, contact by stabilization, primary clarification*

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más críticos y crecientes en Latinoamérica es el deterioro de la calidad de las fuentes superficiales provocada por la descarga de agua residual. En Colombia, el avance en materia de saneamiento hídrico (recolección, transporte y tratamiento de los residuos líquidos) presenta atrasos significativos, pues sólo es tratada el 29% (SSPD, 2009) del agua residual generada. Esta cobertura tan baja en el tratamiento de agua residual, demanda soluciones que permitan minimizar el impacto que las actividades socioeconómicas generan sobre los cuerpos hídricos, una vez se ha hecho uso de estos.

La Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica de Cañaveralejo (PTAR-C) realiza actualmente el tratamiento preliminar y primario del agua residual doméstica de la Ciudad de Cali; desde hace siete años implementó el sistema de tratamiento primario avanzado (TPA), que le permitió mejorar la reducción de materia orgánica carbonácea, hasta el 40% en DBO_5 y 59% en SST (EMCALI, 2006); sin embargo, este nivel tecnológico no está diseñado para alcanzar eficiencias de reducción de carga contaminante, superiores al 80% exigidas en el decreto 1594 de 1984 (MINSALUD, 1984), para el vertimiento de residuos líquidos a fuentes naturales; por esta razón el efluente primario de la PTAR-C es considerado como uno de los puntos de contaminación puntual más importantes que deterioran la calidad del agua del Rio Cauca (Moscoso y Egocheaga, 2004).

Entre los sistemas de tratamiento biológico más comúnmente usados, para reducir los contaminantes presentes en el agua residual se encuentra el Sistema de Lodos Activados (SLA), el cual transforma la materia orgánica presente en el agua residual a CO_2 y biomasa adicional (Boo y Aguilar, 1998). Aprovechando los principios básicos de adsorción de contaminantes del lodo activo (biosorción, hidrólisis y síntesis), se investigó desde el año 1920 (Ullrich y Smith, 1951, Sarioglu et al., 2003) una modalidad de este sistema denominada *Estabilización por Contacto*, la cual por su configuración puede funcionar sin necesidad de clarificación primaria del agua residual (Schultz et al., 1982, Chudoba y Tucek, 1985, Ramalho, 1996, Guellil et al., 2001), acompañada de bajos tiempos de retención hidráulicos (Winkler et al., 1998).

La aplicación de los principios de la cinética microbiana, le confirió a este sistema ventajas importantes frente a otras modalidades de lodos activados, entre las que se destacan su capacidad para manejar mayores choques y cargas tóxicas que los sistemas convencionales, debido a la capacidad de amortiguación de la biomasa en el reactor de estabilización (Al-Mutairi et al., 2008); también reduce el volumen total del sistema de tratamiento en comparación con otras modalidades, debido a que la concentración de SSVLM es mucho mayor en el reactor de estabilización que en el de contacto, ya que esté último recibe lodo más espeso proveniente del sedimentador secundario, lo que permite mantener la mayor parte de la biomasa en una unidad más pequeña (Rittman y McCarty, 2001, Metcalf y Eddy, 2003).

Desde el año 2005 a través del convenio de cooperación EMCALI EIC ESP-Universidad del Valle se han evaluado a escala laboratorio y piloto alternativas de tratamiento secundario para el efluente primario de la PTAR-C, las cuales han perfilado el sistema de lodos activados bajo la modalidad de

estabilización por contacto (SLAEC) como una tecnología con gran capacidad de aplicación a escala real, así mismo se han establecido las características del agua residual doméstica de la ciudad de Cali (EMCALI-UNIVALLE, 2006), concluyendo que es un agua de baja concentración (EMCALI-UNIVALLE, 2008).

Las evaluaciones a escala piloto del SLAEC, han demostrado que su principal ventaja radica en la capacidad para tratar y remover altas cargas de materia orgánica en poco tiempo. Así mismo, la capacidad de recuperación de la biomasa del sistema ante descargas tóxicas, ya que solo el 30% de esta se encuentra en el reactor de contacto y solo esta unidad está en contacto directo con el agua residual afluente. Sin embargo, la eficiencia del sistema en términos de SST es ampliamente influencia por el desempeño del sedimentador secundario, factor determinante en el diseño y operación de este sistema (EMCALI-UNIVALLE, 2007).

Cuando el agua residual afluente a una PTAR pasa por un clarificador primario se reduce la carga contaminante, entre el 50 y 70% de los sólidos en suspensión (SS) y entre el 25 y 40% de DBO_5 (Metcalf y Eddy, 2003); esta disminución de carga contaminante en agua residual concentrada se traduce en menores requerimientos de área y energía para el tratamiento posterior, pero en agua residual de baja carga esta etapa de tratamiento puede omitirse en beneficio del proceso global de tratamiento, además de mejorar el balance en costos de tratamiento.

La Organización Panamericana para la Salud (OPS) a través de su Agenda Política recomienda desarrollar proyectos de tratamiento de agua residual doméstica, incorporando criterios de costo-eficiencia, en este sentido proponer sistemas de tratamiento biológico que puedan prescindir de la clarificación primaria se constituye en una alternativa interesante para ciudades y municipios intermedios, donde la disponibilidad de área para el tratamiento del agua residual es una condición limitante en la selección de tecnología.

Teniendo en cuenta las características de baja concentración de carga contaminante, que exhibe el afluente a la Planta de Tratamiento de Agua de Residual de Cañaveralejo, junto con las posibilidades que brinda el sistema de lodos activados bajo la modalidad de *Estabilización por Contacto*, se evaluó a escala piloto la influencia de la clarificación primaria del agua residual doméstica sobre el desempeño esta modalidad de lodos activados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar a escala piloto la influencia de la clarificación primaria del agua residual doméstica sobre el desempeño de un sistema de lodos activados bajo la modalidad de estabilización por contacto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comparar el desempeño del sistema de lodos activados bajo la modalidad de estabilización por contacto tratando agua residual doméstica con y sin clarificación primaria, en términos de DQO y SST

Analizar el efecto que tiene la ausencia de la clarificación primaria del agua residual doméstica sobre las características del lodo secundario de un sistema de lodos activados bajo la modalidad de estabilización por contacto

3 MARCO REFERENCIAL

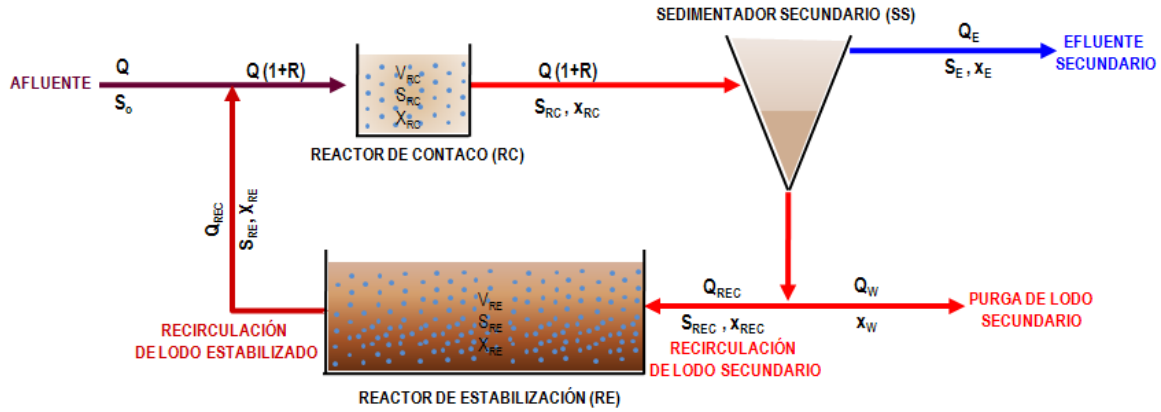
Uno de los sistemas de tratamiento de agua residual (AR) ampliamente usado a nivel mundial es el sistema de lodos activados (SLA); a través de la inyección de aire, éste sistema mantiene en suspensión una mezcla de microorganismos que al entrar en contacto con el AR adquieren los nutrientes necesarios para el desarrollo de sus actividades metabólicas. La presencia de oxígeno en cantidad suficiente garantiza la oxidación biológica de la materia orgánica (MO), reduciendo de esta manera los contaminantes presentes en el AR. Existen diferentes modificaciones del sistema convencional desarrollado por Ardent y Lockett en 1914, citado por Wahlberg (2004); cada una con el propósito de mejorar la relación costo-beneficio, ya que el requerimiento de oxígeno y producción de lodos son quizás las únicas desventajas de este sistema.

3.1 SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN LA MODALIDAD DE ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO (SLAEC)

El SLAEC fue desarrollado como resultado de los estudios realizados por Eckenfelder y Grich, (1935) citado por Al-Mutairi et al. (2003) y Ullrich y Smith (1951). Este proceso se basa en la rápida captación del sustrato coloidal en la biomasa microbiana, gracias a la adsorción física seguida de la degradación enzimática y utilización del material soluble resultante (Al-Mutairi et al., 2003); la rápida eliminación de contaminantes se realiza gracias a la capacidad de bioadsorción del floc biológico (Pujol y Canler, 1992).

El SLAEC se caracteriza por tener dos tanques de aireación separados por un sedimentador secundario (SS). En el primer tanque de aireación ó reactor de contacto (RC) el AR desarenada ó el efluente del clarificador primario (Efluente primario-EP) entra en contacto con la biomasa del sistema; en un corto periodo ó tiempo de retención hidráulico (TRH_{RC}), los cuales oscilan entre 30 y 90 minutos, los contaminantes del AR son adsorbidos por la biomasa microbiana (Ullrich y Smith, 1951, Benefield y Randall, 1976, Sarioglu et al., 2003). Después de este tiempo, la biomasa es conducida hacia el SS donde por efecto de la gravedad son separadas las dos fases y el efluente clarificado (efluente secundario-ES) sale del sistema.

Un porcentaje del lodo activado sedimentado es recirculado hacia el segundo tanque de aireación ó reactor de estabilización (RE), para completar la oxidación y estabilización del material orgánico bioadsorbido, con tiempo de retención hidráulico (TRH_{RE}) entre 3 y 8 horas (Orhon et al., 1977, Sarioglu et al., 2003, Liu et al., 2009). Toda la biomasa microbiana de este reactor es retornada en estado de inanición hacia el RC, para que nuevamente entre en contacto con el AR ó efluente primario y de este modo mantener una concentración de microorganismos en el RC (Ramalho, 1996). El otro porcentaje de lodo activado sedimentado sale del sistema como lodo de exceso; el cual debido a su alto contenido de material orgánico ó biomasa activa debe ser estabilizado, generalmente a través de la digestión anaerobia. En la Figura 3.1 se ilustra el diagrama de flujo del SLAE (Ullrich y Smith, 1951, Gujer y Jenkins, 1975a, Benefield y Randall, 1981, Ramalho, 1996).



Donde:
Q = Caudal del afluente
Q_E = Caudal del efluente
Qw = Caudal de purga del lodo
Q_{REC} = Caudal de lodo recirculado
S = Materia orgánica (DQO)
V_{RC} = Volumen del reactor de contacto
V_{RE} = Volumen del reactor de estabilización
X_{RC} = SSTLM del reactor de contacto
X_{RE} = SSTLM del reactor de estabilización
X_{REC} = SST del lodo de recirculación
Xw = SST del lodo de purga
R = Fracción de recirculación de lodo

Figura 3.1. Diagrama de Flujo del SLAEC
Fuente: Benefield y Randall (1976) y Sarioglu et al. (2003)

La principal ventaja del SLAEC frente a las otras modalidades de SLA, es que este permite una reducción apreciable del volumen del tanque de aireación, debido a que solamente el lodo recirculado es sometido a aireación prolongada, reduciendo el volumen de las unidades de tratamiento hasta en un 30% (Sarioglu et al., 2003). De otro lado, el SLAEC presenta una notable capacidad para adaptarse a altas y bajas cargas orgánicas, además de absorber las sobrecargas hidráulicas sin dificultad, las cuales pueden ser reguladas a través de la tasa de recirculación de lodo (Ullrich y Smith, 1951, Sarioglu et al., 2003).

Otra ventaja importante de este sistema es que permite eliminar la necesidad de la clarificación primaria y reducir los costos de tratamiento del lodo de exceso (Ullrich y Smith, 1951, Ramalho, 1996). Finalmente, debido a la alta carga orgánica que es aplicada sobre el RC, éste actúa como un selector para prevenir la formación de floc filamentoso formado por bacterias filamentosas (Sarioglu et al., 2003).

3.1.1 Capacidad de bioadsorción

El principio de funcionamiento del SLAEC, se basa en aprovechar al máximo la capacidad de biosorción que tiene el floc biológico para generar un efluente tratado en cortos periodos (Tan y Chua, 1997, Guellil et al., 2001). La bioadsorción es un mecanismo fisicoquímico en el cual la eliminación de contaminantes se da por una rápida transferencia de materia desde la fase líquida hacia el floc biológico, por adsorción, absorción y entrampamiento ó almacenamiento (Ullrich y Smith, 1951, Morgoun, 2007). La biosorcion en los SLA, causada por interacciones electrostáticas o hidrofóbicas también depende de la distribución de las fracciones de materia orgánica presente en el

AR (Guellil et al., 2001), las cuales pueden dividirse en: *particulada, coloidal y soluble* (Orhon et al., 1999, Ginestet et al., 2002, Dulekgurgen et al., 2006).

Generalmente, en el agua residual doméstica (ARD) un 75% de los sólidos suspendidos y un 40% de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica (Metcalf y Eddy, 2003); estas proporciones pueden variar, encontrándose ARD con un contenido de material orgánico particulado, coloidal y soluble igual a 45%, 31% y 24% respectivamente (Guellil et al., 2001).

Cuando el lodo activado presente en RC entra en contacto con el AR, la reducción de MO es más rápida que la tasa de consumo de oxígeno esperada para que se lleve a cabo este proceso, indicando que gran parte ha sido adsorbida por el floc (Torrijos et al., 1994 citado por Xu y Qian, 2007) . En esta etapa ocurre una alta reducción de MO en la forma suspendida, coloidal y soluble (Zhang et al., 2009a), la cual depende de las propiedades superficiales del lodo activado, estas incluyen los grupos químicos funcionales de la pared celular, el tamaño del floc el cual determina el área superficial especifica y de la naturaleza microbiológica del lodo activado (Tan y Chua, 1997). El tratamiento mediante el SLAEC es más adecuado cuando la MO presente en el AR esta en forma coloidal o en suspensión (Ramalho, 1996).

Una vez transcurrido el tiempo de retención en RC ó TRH_{RC}, los productos orgánicos adsorbidos se rompen mediante degradación aerobia. Para cada TRH_{RC} existe un tiempo óptimo de estabilización (TRH_{RE}) que corresponde a un porcentaje máximo en la disminución de la materia orgánica (Ramalho, 1996, Liu et al., 2009). Cuando se presentan tiempos de estabilización más extensos se produce una degradación del lodo o fase endógena, de tal forma que el lodo efluente del RE no es adecuado para llevar a cabo la bioadsorción en el RC (Ramalho, 1996). De otro lado, el mecanismo de almacenamiento provee una rápida absorción de la materia orgánica, que después de absorbida, la fracción biodegradable es metabolizada u oxidada a dióxido de carbono (CO_2) y agua, o sintetizada en nuevo material celular (Eckenfelder, 1986).

La presencia de sustancias poliméricas extracelulares (SPE) en el AR ó su producción por los microorganismos a través de la lisis celular o por transporte activo (Sutherland, 2001) permite la agregación de las células bacterianas formando agregados que se denominan flocs biológicos. Las SPE incluyen diferentes clases de macromoléculas, tales como polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, lípidos y otros compuestos poliméricos que ocupan el espacio entre las células microbianas (Garnier et al., 2005). Las propiedades fisicoquímicas de las SPE definen los mecanismos de transferencia de MO en el SLA. Así mismo, las SPE adquieren importancia en la floculación y sedimentación del lodo activado, la presencia de grupos de polisacáridos, proteínas y sustancias húmicas cargadas negativamente, permiten la formación de puentes con cationes divalentes a través de los cuales se favorece la estructura del floc, aumentando el potencial zeta y reduciendo el grado de dispersión del floc (Mikkelsen y Keiding, 2002).

3.1.2 Variables de operación y control

Las variables de operación y control en los SLA están relacionadas con los factores que afectan ó controlan el metabolismo de los microorganismos aerobios, que permite la incorporación de

nutrientes para la transformación de MO biodegradable. Las variables de operación y control más importantes en el SLAEC son la fracción de distribución de lodo (Factor α), Tiempo de Retención Celular (TRC), porcentaje de recirculación de lodo (R), Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor Mixto (SSVLM), Oxígeno Disuelto (OD), Relación Alimento /Microorganismo (A/M) y Carga Orgánica Volumétrica (COV).

Fracción de distribución del lodo (Factor α). Es el parámetro que define la proporción de biomasa que está en contacto directo con el agua residual afluente, su valor se determina a través de la Ecuación 3.1 (Sarioglu et al., 2003).

$$\alpha = \frac{V_{RC} \cdot X_{T \cdot RC}}{V_{RC} \cdot X_{T \cdot RC} + V_{RE} \cdot X_{T \cdot RE}}$$ Ecuación 3.1

Donde:

V_{RC}, V_{RE}: volumen del reactor de contacto y estabilización respectivamente, (m^3)

$X_{T \cdot RC}$, $X_{T \cdot RE}$: concentración de biomasa total en el respectivo reactor ó sólidos suspendidos volátiles en licor mixto (SSVLM) de cada reactor, ($mgSSV.L^{-1}$)

Sarioglu et al. (2003), recomiendan que el valor de α sea inferior a 0.30, ya que valores superiores incrementan el volumen del RC e influyen para que el RE opere como un SLA, perdiendo la particularidad del SLAEC; razón por la cual el factor α es el parámetro más importante para el diseño de SLAEC y es exclusivo de esta modalidad. Grandes volúmenes de RC significan altos TRH, favoreciendo los mecanismos de oxidación biológica en esta unidad y no la bioadsorción como mecanismo principal que transfiere la MO del líquido hacia el floc biológico. Recientemente, se ha encontrado que un valor de α entre 0.1 y 0.2 es suficiente para obtener reducciones de MO en términos de DQO y DBO_5 mayores al 80% (Vásquez et al., 2011).

Tiempo de retención celular (TRC). La definición del TRC afecta el comportamiento del proceso de tratamiento (van Haandel y Marais, 1999), el volumen del tanque de aireación, la producción de lodos y los requerimientos de oxígeno en el sistema (Metcalf y Eddy, 2003). Cuando el objetivo del SLA es la reducción de la materia orgánica soluble, a 25ºC con TRC entre 1 y 2 d se alcanza este objetivo evitándose el proceso de nitrificación, sin embargo cuando la temperatura disminuye hasta 15ºC es necesario entre 5 y 6 d para obtener resultados similares (Sykes, 1995).

Por otro lado, el TRC determina el tipo de microorganismos que se favorecen en el sistema (von Sperling, 1996, van Haandel y Marais, 1999); para el SLAEC el rango recomendado varía entre 4 y 15 d (Benefield y Randall, 1981, Orozco y Salazar, 1987, Metcalf y Eddy, 2003) y puede ser controlado a través de la tasa de purga o caudal de eliminación de lodo de exceso (Ramalho, 1996).

Liu et al. (2009) encontraron que 6 d como TRC en un SLAEC permite alcanzar la máxima adsorción y eliminación de DQO, $N\text{-}NH_4^+$ y PO_4^{3+}, la eliminación de este último fue atribuida principalmente a la purga de lodo de exceso; con TRC menores (ej. 3 d) se presenta menor eliminación. De otro lado, el incremento en el TRC tiene un efecto importante en la calidad y producción de lodo de exceso; esta

última se puede reducir en un 60% cuando el TRC se aumenta de 2 a 18 d (Wei et al., 2003). Adicionalmente, con altos TRC el alimento o sustrato en el licor mixto es escaso, razón por la cual el TRC es considerado como un parámetro nutricional de los SLA. El TRC es inversamente proporcional a la relación alimento / microorganismo (A/M), donde a mayores valores de TRC menor cantidad de alimento está disponible por unidad de microorganismo (Sanin et al., 2006), condición que favorece el desarrollo del metabolismo endógeno (Metcalf y Eddy, 2003).

Por otro lado, mantener TRC entre 2 y 3 d no permite el desarrollo de predadores de bacterias libres, obteniéndose un efluente de baja calidad, dado que parte del lodo activo descargado en el efluente está conformado por bacterias libres, así las concentraciones de DBO_5 y SSV tienden a ser altas, con TRC entre 5 y 8 d los predadores de bacterias libres se desarrollan y la concentración de DBO_5 y SSV es menor (van Haandel y van der Lubbe, 2007).

Porcentaje de recirculación de lodo (R). El porcentaje de recirculación de lodo tiene dos funciones principales, en SLA su valor es escogido de tal forma que la clarificación (separación sólido - líquido) sea el proceso predominante en el sedimentador secundario (SS), por encima del proceso de espesamiento (van Haandel y Marais, 1999). Sarioglu et al.(2003) indica que R puede ser expresada a través de Ecuación 3.2, derivada a partir del balance de masa en torno a la biomasa en el SS; dicha ecuación es fundamentalmente, una extensión de la fórmula empleada en un SLA en la que el porcentaje de recirculación de lodos depende del TRC.

$$R = \frac{1 - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{TRH_{RC}}{TRC}}{\frac{X_{T \cdot REC}}{X_{T \cdot RC}} - 1}$$ Ecuación 3.2

Donde:

α:	Fracción de distribución de lodos
TRC:	Tiempo de Retención celular, (d)
TRH_{RC}:	Tiempo de Retención hidráulico en el reactor de contacto, (h)
$X_{T \cdot RC}$:	Concentración de biomasa total en el reactor de contacto, ($mgSSV.L^{-1}$)
$X_{T \cdot REC}$:	Concentración de biomasa total en la recirculación, ($mgSSV.L^{-1}$)

Sólidos Suspendidos Volátiles en Licor Mixto (SSVLM). Los SLA son operados en un amplio rango de concentración de SSVLM; este es un factor muy importante ya que es una representación aproximada de la biomasa activa en el sistema (von Sperling, 1996). El SLAEC maneja dos valores de concentracion de SSVLM, la cual usualmente es mucho menor en el RC que en el RE, debido a que este último es alimentado solo por el lodo recirculado desde el SS. El rango de concentración de SSVLM recomendado para el RC se encuentra entre 1.000 y 4.000 $mg.L^{-1}$ y para el RE entre 4.000 y 10.000 $mg.L^{-1}$ (Rittman y McCarty, 2001, Orozco, 2003).

Grady et al. (1999) recomiendan que para cada sistema en particular se debe establecer el rango mínimo de operación de SSVLM, con concentraciones inferiores a ese rango se deteriora el desempeño del sistema, ya que este parámetro tiene influencia directa sobre los procesos de biofloculación, entrampamiento ó almacenamiento de la materia orgánica particulada en el floc y las características de sedimentabilidad. Para SLA el rango mínimo propuesto por estos autores es de 500mg.L^{-1}. Sarioglu et al. (2003) afirma que en los SLAEC la concentración de SSVLM en el RC debe ser aproximadamente de 2 a 3 veces la concentración SSVLM en RE, teniendo en cuenta un buen funcionamiento del SS y el factor α.

Oxígeno Disuelto (OD). Para apoyar las reacciones de oxidación biológica en el SLA, debe mantenerse una concentración de OD para lograr la oxidación de la materia orgánica carbonácea, valores entre 2 y 3 mg.L^{-1} son los recomendados debido a las fluctuaciones diarias de la carga orgánica en el ARD (Sykes, 1995). El principal efecto de la baja concentración de OD sobre el desempeño de un SLA se observa en el crecimiento de bacterias filamentosas, las cuales generan problemas de "bulking filamentoso" (Grady et al., 1999) y el efecto de esta condición se potencializa cuando se presentan altas cargas orgánicas (Martins et al., 2003).

El porcentaje de recirculación de lodo en SLAEC tiene gran incidencia sobre los requerimientos de OD. Cuando se incrementa la tasa de recirculación desde el SS hacia el RE, también se aumenta la concentración de SSVLM en el RC, por lo tanto el requerimiento de oxígeno es mayor, sin embargo, el requerimiento de oxígeno en el RE se disminuye. Este comportamiento podría tener un efecto desfavorable sobre el volumen de cada uno de los reactores (RC y RE), dado que sería necesario ajustar los volúmenes de acuerdo con los requerimientos de la biomasa (Grady et al., 1999).

La sedimentabilidad del lodo también tiene una amplia relación con la concentración de OD; con valores de OD inferiores a 1.1mg.L^{-1} el Índice Volumétrico de Lodos (IVL) se incrementa hasta valores superiores a 250 mL.g^{-1} (Martins et al., 2003) y de acuerdo con von Sperling (2001) valores de IVL superiores a éste son característicos de lodo de mala ó pobre sedimentabilidad. En algunos SLA la sedimentabilidad del lodo se puede mejorar solamente incrementando la concentración de OD hasta 2.0 mg.L^{-1} (Martins et al., 2003).

Relación alimento / microorganismo (A/M) y Carga orgánica volumétrica (COV). La relación A/M y la COV determinan la carga neta aplicada en el sistema, susceptible a ser absorbida por el floc biológico en el RC y utilizada en el RE para el catabolismo (Orozco y Salazar, 1987). La relación A/M representa la masa de sustrato aplicada diariamente al tanque de aireación contra la masa de sólidos suspendidos (microorganismos) en el tanque de aireación, su valor se encuentra relacionado con la tasa de utilización del sustrato (Metcalf y Eddy, 2003).

Los valores típicos de A/M recomendados para el SLAEC oscilan entre 0.1 y 0.6 kg DBO_5·(kg.SSVLM·d)$^{-1}$ (Benefield y Randall, 1981, Rittman y McCarty, 2001). Mardani et al. (2011) reportó que para un SLAEC tratando agua residual doméstica, la relación A/M varió entre 0.42 y 0.16 kg DBO_5·(kg.SSVLM·d)$^{-1}$ con TRC entre 7d y 18d. La COV se basa en las experiencias con SLA en el tratamiento de agua residual doméstica; generalmente su valor se encuentran entre 1 y 1.3 kgDBO_5·(m^3.d)$^{-1}$ (Metcalf y Eddy, 2003).

Tiempo de retención hidráulica (TRH). En el SLAEC el concepto de TRH hace referencia al periodo que el AR está en contacto con el lodo recirculado (TRH_{RC}) y al periodo de estabilización ó TRH en el RE (TRH_{RE}), que tiene como propósito permitir que el material orgánico bioadsorbido en RC sea metabolizado hasta que el lodo este estabilizado (Siddiqi et al., 1967), esto quiere decir que la superficie activa del floc sea restablecida. Recientemente, Liu et al. (2009) sugieren 2 h como TRH_{RE} apropiado para desarrollar el proceso de oxidación y estabilización del lodo en un SLAEC con TRC de 6 d y 40% de recirculación de lodo.

El TRH_{RE} en el SLAEC tiene gran importancia en su desempeño, tiempos elevados inactivan la producción enzimática (EPS), responsable de la capacidad de adsorción y aglomeración de las partículas (Sanin et al., 2006, Yu et al., 2007). Siddiqi et al. (1967) encontrarón inactivación de la producción enzimática (EPS) a medida que el periodo de estabilización se incrementó desde 1 h hasta 12 h. De acuerdo con Ramalho et al. (1996) una vez superado el tiempo requerido para solubilizar y asimilar el material orgánico suspendido, coloidal y particular almacenado en el floc biológico, se produce una degradación del lodo (fase endógena) de tal forma que el lodo efluente del RE no es adecuado para llevar a cabo la bioadsorción en el RC.

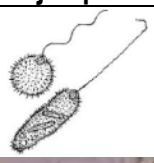
3.1.3 Microbiología del proceso de lodos activados

El floc biológico es una mezcla heterogénea de partículas orgánicas, microorganismos, coloides, SPE y componentes inorgánicos (cationes) (Frølund et al., 1996). Las bacterias son las principales responsables de la depuración de la materia orgánica carbonácea y la estructura del floc; sin embargo, los componentes de la microfauna (protozoos y micrometazoários) también desempeñan un papel importante en el mantenimiento del equilibrio de la comunidad de bacterias (Bento et al., 2005).

Una vez que la comunidad microbiana presente en un SLA se estabiliza, su composición depende de la calidad del sustrato y de las condiciones ambientales en el tanque de aireación. En un sistema que opera adecuadamente, predominan las bacterias con morfología de bastones gran negativos (Cordi et al., 2008). La presencia de bacterias filamentosas y hongos indica condiciones ambientales adversas tales como cargas orgánicas altas, bajo pH, cantidades deficientes de nutrientes y bajos niveles de OD (Carceller, 1998).

Los protozoos y metazoos han sido denominados como representantes de la microbiota de los SLA, desempeñan el papel de bioindicadores del proceso, debido a que son susceptibles a múltiples factores como pH, concentración de OD, temperatura, DBO_5, etc.; además, pueden ser identificados con relativa facilidad contario a las bacterias cuya identificación es lenta y laboriosa (Vazollér et al., 1989). En un sistema bien equilibrado, existe una buena diversidad de protozoos con predominio de ciliados libres y fijos (Carceller, 1998). Las bacterias, hongos y algunos protozoos flagelados son microorganismos descomponedores y los protozoos y metazoos (rotíferos y nematodos) son microorganismos consumidores (Vilaseca, 2001). En la Tabla 3.1 se presentan las relaciones existentes entre algunos microorganismos y las condiciones de desempeño del SLA.

Tabla 3.1 Microorganismos indicadores del desempeño del SLA

Microorganismo	Característica del proceso	Ejemplo
Predominancia de flagelados y rizopodos	Inicio de operación Bajo TRC	
Predominancia de flagelados	Deficiencia en la aireación Sobrecarga orgánica	
Predominancia de ciliados pedunculados y libres	Buenas condiciones de tratamiento	
Predominancia de *Aspidisca costaca*	Nitrificación	
Predominancia de *Trachelophyllum sp* (ciliado libre)	Alto TRC	
Predominancia de *Vorticella microstoma*	Efluente de mala calidad	
Predominancia de *Anélidos del genero Aelosoma*	Exceso de oxigeno disuelto	

Fuente: Cordi et al. (2008)

La microscopia como herramienta para el control y evaluación del desempeño de los SLA ha sido ampliamente estudiada, llegando a establecer correlaciones entre los diferentes tipos de organismos y otras variables operacionales como TRC y OD, así mismo, ha servido para predecir las características de sedimentabilidad del lodo. La aparición de *Arcella sp, Aspidisca sp y Euglypha sp* en frecuencias mayores al 95% son indicadores del grado de estabilidad de los sistemas biológicos, TRC altos, buenas reducciones de DBO_5 y condiciones de OD favorables para la nitrificación. La presencia de zoogleas en densidades superiores a $1.0X10^4$ individuos.mL están asociados a lodos con densidad elevada y bajas características de sedimentabilidad (IVL>100 $mL.g^{-1}$) (Bento et al., 2005).

Adicionalmente, la microscopia ha permitido establecer que durante la etapa de arranque de un SLA, la población de bacterias es joven y relativamente pequeña, lo cual no permite la formación del floc biológico. A medida que el TRC se incrementa, aparecen en el licor mixto organismos superiores como protozoos y metazoos que junto a las bacterias inician la formación del floc. Un SLA saludable se caracteriza por la presencia abundante de ciliados nadadores libres (Gerardi, 2002); flagelados como *Paramecium* y *Charchesium* pueden iniciar la floculación de material disperso debido a las excreciones que estos organismos generan.

3.2 SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA EN EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS

La sedimentación secundaria juega un papel fundamental en el desempeño de los SLA, la óptima separación de la fase sólido/líquido se transforma en un efluente clarificado de alta calidad y un lodo activado concentrado (Sheng et al., 2008); las propiedades individuales del floc regulan los procesos de agregación y desagregación que tienen lugar en esta unidad

En los SLA los sedimentadores secundarios desempeñan dos funciones: *(i) clarificación*, separación de la fase sólida y líquida del licor mixto, necesaria para producir un efluente libre de sólidos y *(ii) densificación,* aumento de la concentración de sólidos suspendidos durante su paso por esta unidad (van Haandel y Marais, 1999). En la modalidad de estabilización por contacto, el sedimentador secundario (SS) adquiere mayor importancia, ya que además define la relación entre la biomasa del RC y el RE (Sarioglu et al., 2003).

3.2.1 Sedimentabilidad del lodo activado

Normalmente, en los sedimentadores secundarios de SLA se presentan concentraciones de sólidos suspendidos en el licor mixto entre 2.000 y 5.000 $mg.L^{-1}$ (van Haandel y Marais, 1999), por lo cual el fenómeno de sedimentación que predomina es la sedimentación zonal (tipo 3), seguida de sedimentación por compresión (tipo 4) (Metcalf y Eddy, 2003). Las concentraciones que se presentan en este tipo de sedimentación permiten que las partículas se encuentren a distancias tan reducidas que se adhieren entre sí y sedimenten masivamente, creando una clara superficie de separación entre el floc biológico y el líquido sobrenadante (Maldonado 2004).

Diversas investigaciones han sido desarrolladas para formular métodos que describan la sedimentabilidad del lodo en los SLA (Vanderhasselt et al., 1999, Zhang et al., 2009b). Los modelos más conocidos para correlacionar la velocidad de sedimentación zonal (VSZ) y la concentración de sólidos suspendidos, son los de Vesilind (1968) y Dick (1972) citado por van Haandel y Maaris, (1999). Existen otros parámetros alternativos para cuantificar la sedimentabilidad del lodo, entre ellos el más antiguo y aplicado es el índice volumétrico de lodo (IVL), seguido por el índice volumétrico diluido (IVLD), que surge como una alternativa para la eliminar la influencia de la concentración inicial de sólidos suspendidos, durante la determinación del IVL (van Haandel y Marais, 1999).

Velocidad de sedimentación zonal (VSZ). En los sedimentadores secundarios, superpuesta sobre la velocidad del flujo descendente del líquido hay una VSZ del floc con respecto a la fase líquida (van

Haandel, 1992), la cual es función de la concentración de sólidos y de la condición ó característica de los mismos (Metcalf y Eddy, 2003). La influencia de la concentración de SST sobre la VSZ puede estimarse aplicando la ecuación de propuesta por Vesilind (1968) citado por van Haandel (1992), a través de la cual se describe el comportamiento de la sedimentabilidad de los lodos. Matemáticamente la VSZ se expresa como lo presenta la Ecuación 3.3.

$$VSZ = v_0 \cdot e^{(-k \cdot X_t)}$$ Ecuación 3.3

Donde:

VSZ : Velocidad de sedimentación a una concentración X_t ($m.h^{-1}$)
X_t : Contenido de sólidos suspendidos en el licor mixto ($kg\ SSTLM.m^{-3}$)
v_0 : Coeficiente, expresa la velocidad de sedimentación en la interface, donde $X_t=0$ ($m.h^{-1}$)
k : Coeficiente de sedimentación ($m^3.kg^{-1}$)

Los coeficientes v_o y k se determinan experimentalmente a través del *test de VSZ* desarrollado por White (1975) citado por van Haandel y Marais (1999). En un cilindro transparente se dispone una cantidad de lodo activado, el cual es suavemente agitado por un agitador vertical accionado por un motor de baja rotación. En la Figura 3.2 se ilustra la representación gráfica del equipo y una curva típica de la interfase sobrenadante – lodo.

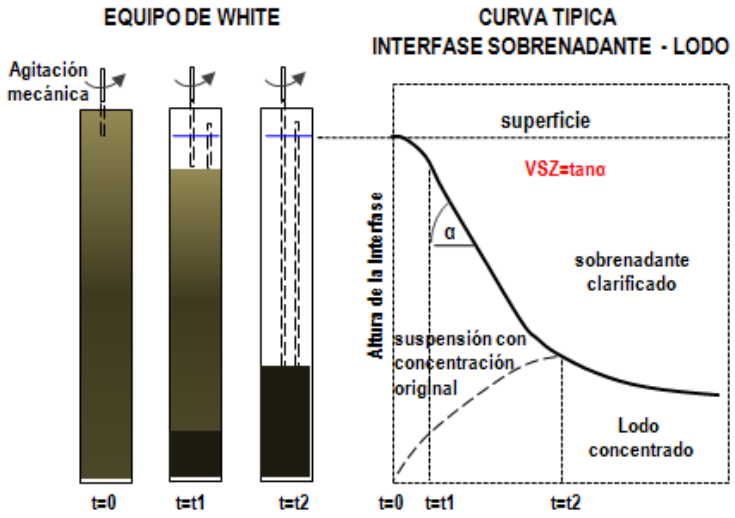


Figura 3.2 Equipo de White para determinar la VSZ y una curva típica de la interfase sobrenadante – lodo
Fuente: van Haandel y Marais (1999)

El objetivo del montaje anterior, es describir la curva de la separación sólido líquido a medida que transcurre el tiempo de sedimentación, con la cual se estima finalmente el valor de la VSZ en la parte lineal de la curva (van Haandel y Marais, 1999).

El test de VSZ no es de uso frecuente en las prácticas de operación de SLA como lo es el ensayo de IVL, probablemente debido a que la metodología para su determinación es más laboriosa (Renko, 1998). Por lo anterior, diversos autores han realizado relaciones empíricas que relacionan el IVL con

las constantes de sedimentabilidad v_o y k obtenidas en el ensayo de VSZ; sin embargo, dada su naturaleza empírica su universalidad no puede ser del todo asegurada, puesto que han sido determinadas bajo diferentes condiciones experimentales (Giokas et al., 2003).

von Sperling (2001) realizó una amplia recopilación de estudios realizados entre 1976 y 1995, en los que bajo diversas condiciones experimentales, diferentes autores aplicaron la ecuación de Vesilind (Ecuación 3.3.) para determinar la velocidad de sedimentación del lodo; como resultado de dicha investigación construyó la Tabla 3.2 en la que cualifica la sedimentabilidad del lodo entre óptima y pobre, de acuerdo con los valores de las constantes de Vesilind, de esta manera un lodo con buena sedimentabilidad deberá presentar un valor de v_o mayor a 8.6 $m.h^{-1}$ y k menor a 0.5 $m^3.kg^{-1}$.

Tabla 3.2 Valores de los coeficientes v_o y k (constantes de Vesilind)

Sedimentabilidad	VSZ	
	v_o ($m.h^{-1}$)	k ($m^3.kg^{-1}$)
Óptima	10,0	0,3
Buena	9,0	0,4
Media	8,6	0,5
Pobre	6,2	0,7
Muy pobre	5,6	0,7

Fuente: von Sperling (2001)

Índice volumétrico de lodos (IVL). El IVL cuantifica la sedimentabilidad del lodo, determinando el volumen ocupado por los sólidos en una probeta de 1 L durante un periodo determinado, generalmente 30 minutos; con la concentración inicial del lodo se calcula el volumen ocupado por 1.0 gr de sólidos en suspensión después de 30 min de sedimentación (van Haandel y Marais, 1999) tal como se indica en la Ecuación 3.4 (Droste, 1997).

$$IVL = \frac{y}{X_t} \times 1000$$ Ecuación 3.4

Donde:

IVL : Índice volumétrico de lodos ($mL.g^{-1}$)

y : Volumen asentado de lodo ($mL.L^{-1}$)

X_t : Contenido de sólidos suspendidos en el licor mixto (mg $SSTLM.L^{-1}$)

A pesar de ser un parámetro ampliamente usado en las PTAR por su simplicidad y rapidez, presenta un defecto, ya que su valor depende de la concentración inicial de sólidos, por lo cual su utilidad para cuantificar la sedimentabilidad del lodo es limitada (van Haandel y Marais, 1999). Para concentraciones de SST mayores a 4.000$mg.L^{-1}$ la aplicación de esta prueba está restringida (Vesilind, 2003).

Al igual que con los valores de VSZ, von Sperling (2001) también propone un rango para el IVL, de tal forma que la sedimentabilidad del lodo sea asociada a este parámetro, incluyendo el IVLD; los

valores se presentan en la Tabla 3.3 resaltándose que un IVL mayor a 250 $mL.g^{-1}$ describe un lodo con pobres características de sedimentabilidad, caso contrario ocurre con IVL menores.

Tabla 3.3 Rangos y valores típicos de IVL e IVLD

Sedimentabilidad	Valores para el Índice volumétrico de lodos ($mL.g^{-1}$)			
	IVL		IVLD	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Óptima	0 - 50	45	0 - 45	40
Buena	50 - 100	75	45 - 95	70
Media	100 - 200	150	95 - 165	130
Pobre	200 - 300	250	165 - 215	190
Muy pobre	300 - 400	350	215 - 305	260

Fuente: von Sperling (2001)

3.2.2 Producción de lodos

En los sistemas biológicos aerobios, la producción de lodos depende de diferentes factores tales como: la biodegradabilidad de los contaminantes orgánicos, la degradación de las células microbianas por respiración endógena o lisis celular, la ingestión de bacterias por los organismos superiores (Lee y Welander, 1996), la cantidad de sólidos inertes en el afluente y de la temperatura del licor mixto (Forster y Foundation, 2003).

La producción de lodos está relacionada con la fracción biodegradable de SSV generada en el sistema, a partir de un TRC especifico. La producción bruta de SSV ($P_{X,SSV}$), es decir el crecimiento de la biomasa producto de la transformación de la materia orgánica biodegradable es el resultado de multiplicar el coeficiente de rendimiento (Y) por la carga de DBO_5 eliminada (von Sperling y Chernicharo, 2005) (ver Ecuación 3.5).

$$P_{X,SSV} = Y_{obs} \cdot Q(S_o - S)$$ Ecuación 3.5

Donde:

$P_{X,SSV}$: Producción bruta de lodo activo

Y_{obs} : Coeficiente de rendimiento observado (g SSV producidos.(g de substrato reducido)$^{-1}$)

S_o : DBO_5 afluente ($mg.L^{-1}$)

S : DBO_5 efluente ($mg.L^{-1}$)

Por otro lado, van Haandel y van der Lubbe (2007) definen el término coeficiente de producción de lodos (P_x), como la relación entre la carga de lodo de exceso (purga de lodo del sistema) y carga de DQO eliminada; a partir del cual puede ser estimada de forma más práctica la producción total de lodos. Matemáticamente se expresa como se presenta en la Ecuación 3.6.

$$P_x = \frac{Carga\ \ lodo_{purgado}}{Carga\ \ DQO_{eliminada}} = \frac{Q_w \times X_w}{Q \times (S_o - S)}$$ Ecuación 3.6

Donde

P_x : coeficiente de producción de lodo (kg ST.(kg DQO $_{removida}$)$^{-1}$)

En la Tabla 3.4 se presentan algunos valores de la producción de lodos de exceso con relación a la materia orgánica removida, según diferentes autores.

Tabla 3.4. Producción de lodo de exceso en Sistemas de Lodos Activados

Autor	Producción de lodos (kg SST.(kg $DBO_{5\ r}$)$^{-1}$)	Tecnología
Lee y Welander (1996)	0.23	Dos etapas
Romero (2000)	0.50	SLAC
Lee et al. (2003)	0.16	Biorreactores de membrana de lodos activados
Lee et al. (2006)	0.40	SLAC acoplado con un sistema de oxidación del lodo con ozono
Mahmood y Elliott (2006)	0.40–0.60	SLAC
Mahmood y Elliott (2006)	0.15-0.30	Aireación Extendida
van Haandel y van der Lubbe (2007)	0.50	SLAC
Ichinari et al. (2008)	0.27	SLAC

3.3 CLARIFICACIÓN PRIMARIA DEL AGUA RESIDUAL

La sedimentación de partículas por acción de la gravedad es uno de los procesos más utilizados en el tratamiento del AR. Generalmente es el primer paso en el tratamiento del ARD denominado como tratamiento primario, en el cual la separación de partículas, sólidos, líquidos ó gases que tienen densidad diferente que el medio de suspensión (agua) se asientan ó flotan debido a la fuerza de la gravedad (Coppen, 2004). Los tanques en los cuales tiene lugar este proceso han sido denominados clarificadores, por lo que el proceso normalmente es conocido como clarificación primaria; su principal objetivo es remover sólidos sedimentables y material flotante presente en el AR; reduciendo una parte de la carga orgánica y nutrientes (Rosinski, 2001).

Los clarificadores primarios pueden constituir el único medio de tratamiento del AR ó bien pueden utilizarse como un paso preliminar para el tratamiento posterior. Cuando estas unidades han sido bien proyectadas y operadas eficazmente, eliminan entre el 50 y 70% de los sólidos suspendidos y del 25 al 40% de la DBO_5 (Metcalf y Eddy, 2003, WEF, 2005, Fuchs y Staudinger, 1999), estos niveles de eficiencia se alcanzan gracias a la tendencia natural de las partículas del AR a aglomerarse en partículas más grandes, obedeciendo las leyes que rigen la sedimentación floculenta ó tipo 2, en la cual bajo condiciones de reposo las partículas presentes en un AR se juntan o floculan, ganando peso y aumentando la velocidad de sedimentación (Droste, 1997).

La clarificación primaria ha sido ampliamente usada como tratamiento único del ARD debido a su simplicidad y su probada capacidad para eliminar un gran porcentaje de los SST y DBO_5 a un costo

unitario bajo (Reardon, 2005). Sin embargo, hay limitaciones inherentes a la clarificación primaria convencional que la hacen poco atractiva económica y ambientalmente frente a la normatividad reciente. Los factores que influyen en su desempeño son la velocidad de sedimentación relativamente baja de muchas partículas y la elevada proporción de sólidos en suspensión no sedimentables en el AR, de esta manera la eficiencia en la reducción de SST y DBO_5 está limitada por la fracción de partículas no sedimentables (Reardon, 2005).

En un clarificador primario convencional la eficiencia de reducción de SST es dependiente de la presencia de partículas suspendidas finas en el AR que corresponden a una gran fracción de los SST, puesto que es casi imposible lograr la separación de estas partículas (tamaño menor a 50µm) bajo mecanismos de sedimentación convencional (Peavy, 1985 citado por Guang et al., 2005).

Una manera práctica de determinar la cantidad y asentabilidad de los sólidos en el AR que se pueden separar por sedimentación simple, es mediante la determinación de los sólidos sedimentables (Ssed), los cuales son determinados en un cono Imhoff de 1 L bajo un tiempo determinado de sedimentación (Orozco, 2003). Sin embargo, se ha encontrado que esta metodología presenta limitaciones concernientes a su precisión, la cual puede ser afectada por aspectos que inician desde cómo se efectúa la orientación del equipo. Así mismo, cuando se requiere conocer la relación de Ssed con los SST de una muestra determinada, se presenta incertidumbre en la correlación de este parámetro expresado en términos volumétricos con el otro determinado gravimétricamente. Esta incertidumbre puede ser debida a que la naturaleza heterogénea de la MO particulada en el AR, hace que las medidas en términos volumétricos sean poco confiables y la misma muestra puede tener diferentes valores de SSed simplemente por la manera en que el material particulado llega al cono, por lo que el método gravimétrico es preferible en su determinación (Tebbut, 1979).

De acuerdo con Hernández (2008) la decisión de suprimir la clarificación primaria en el tratamiento del AR, depende exclusivamente del tipo de tratamiento biológico que considere aplicar, pero en ningún caso cuando se emplean sistemas como lodos activados convencionales ó filtros percoladores. Las principales ventajas de omitir la clarificación primaria se relacionan con mayor simplicidad en la operación de la planta, la purga de lodo se concentra en un solo punto, elimina olores y mejora las características de sedimentabilidad del lodo secundario (Wilén et al., 2008), mientras que las desventajas son de tipo operacional como pérdida de un elemento de regulación hidráulica y de carga, frente a caudales máximos y sobrecargas orgánicas (Wilén et al., 2008); así mismo se incrementa el peligro de acumulación de flotantes en el sedimentador secundario (Ullrich y Smith, 1957) si no hay una buena eliminación de grasas en el afluente y acumulación de arenas en el tanque de aireación en la medida que los desarenadores no funcionen de forma adecuada secundario (Wilén et al., 2008).

Wilén et al. (2008) también sugieren que eliminar la clarificación primaria podría tener un efecto positivo sobre las propiedades de separación liquido-sólido del floc en los SLA, sin embargo recomienda tener en cuenta la naturaleza de los sólidos sedimentables, ya que se ha encontrado que el mecanismo de hidrólisis del sustrato sedimentable es 40% más lento que el comúnmente

asociado con la hidrólisis del sustrato lentamente biodegradable en el ARD (Okutman et al., 2001), aspecto que podría resultar poco beneficio en un sistema biológico.

Dependiendo de las características del sustrato, en SLA sin clarificación primaria puede haber presencia en el licor mixto de sólidos suspendidos no biodegradables o inertes, la ausencia de esta etapa primaria contribuye con un 50 y 70% de los sólidos totales dentro del sistema (Schultz et al., 1982, Chudoba y Tucek, 1985), y entre el 25 a 40% de la DQO del afluente. También pueden ingresar al sistema biológico partículas sólidas biodegradables, las cuales son absorbidas por el floc y convertidas en sólidos solubles por los mecanismos de hidrólisis y posteriormente aprovechados por las células microbianas (Bolzonella et al., 2005).

3.4 APLICACIONES DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS

El uso de los SLA para el tratamiento del ARD es una alternativa ampliamente difundida a nivel mundial, sin embargo, en más de 80 años de investigación y desarrollo de los SLAEC para el tratamiento del ARD, con ó sin clarificación primaria son pocas las experiencias documentadas disponibles en la literatura científica.

3.4.1 Sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto-(SLAEC)

Los primeros estudios científicos de esta modalidad de lodos activados datan de 1922, desarrollados por Coombs en Inglaterra citados por Sarioglu et al. (2003) y luego en 1951 en Estados Unidos por Ulrich y Smith. Entre los años 1950 y 1960, se divulgaron algunos artículos que brindaban información sobre el desempeño de PTAR a escala real, especialmente en Estados Unidos.

La PTAR de Peoria (Estados Unidos) es uno de los pocos SLAEC a escala real de los que se ha divulgado su desempeño. Un aspecto interesante de la configuración de esta PTAR es que una fracción del lodo sedimentado era recirculado directamente hacia el RC y al RE, a este último también llega una fracción de lodo digerido que ayuda en el control del IVL (Kraus, 1955).

Kraus (1955) evaluó el efecto de la doble de aireación (superficial y difusa) sobre el desempeño de esta PTAR, este sistema se implementó para equilibrar la sobrecarga orgánica que en horas pico excedía en 4.4 veces su carga de diseño, lo cual generaba pérdida en el nivel de OD en el tanque de aireación (RC) y generalmente, se requería más de una semana para estabilizar el sistema. Entre las ventajas de la doble aireación, esta investigación encontró una alta efectividad en el tratamiento disminuyendo los costos relacionados con el suministro de oxígeno, los dos sistemas de aireación incrementaron la turbulencia en el tanque de aireación lo que incrementó la tasa de transferencia de oxígeno.

Grich (1961) describió el desempeño de cuatro PTAR que operaban bajo una modalidad denominada “reaireación de lodos activos”, término que hacía referencia a lo que actualmente se conoce como SLAEC. De acuerdo con esta experiencia, las PTAR que trataban ARD con TRH entre 0,5 y 1.0 h en RC, y entre 2.0 y 2.5 h en RE y recirculación de lodo entre 70 y 100%, obtenían

eficiencias de reducción de DBO_5 del 96%. Mientras que las PTAR que tenían un AR con características de difícil tratabilidad, como las de una industria papelera, requerían TRH_{RC} entre 1.5 y 1.7 h y TRH_{RE} entre 5.7 y 11.5 h y recirculación de lodo entre 80 y 140%, para igualar el nivel de eficiencia anterior.

Haseltine (1961) recopiló la información de 36 PTAR en Estados Unidos, que hasta el año 1961 empleaban el sistema denominado "reaireación de lodos activos". Los datos recopilados mostraron que estos sistemas soportaban como mínimo el doble de COV, en comparación con las PTAR que operaban como SLAC. Sin embargo, al comparar las eficiencias de reducción de DBO_5 y la relación A/M encontraron que los SLAC eran preferibles cuando la relación A/M era menor a 0.3 kg $DBO_5 \cdot (kg.SSVLM \cdot d)^{-1}$, debido a menores requerimientos de oxígeno.

Weston (1961) presentó las consideraciones que se tenían en cuenta para el diseño de los sistemas denominados "reaireación de lodos activos". Entre los principales aportes de este documento se destaca que el tiempo de aireación (TRH_{RC}) para un grado de tratamiento dado depende ampliamente de las características del lodo retornado desde el RE, habiendo estimado que entre 2 y 4 h se alcanza entre el 90 y 95% de la estabilización del lodo en el RE. Así mismo, afirma que para tener un sistema de reaireación de lodos activos bien operado, el tiempo total de aireación (TRH_{RC} + TRH_{RE}) es el mismo que el requerido en un SLAC, sin embargo la diferencia en eficiencia de los procesos radica en que el SLA las enzimas que se producen durante el periodo de estabilización pueden ser altamente solubles en agua y se pierden en el efluente, mientras que en el otro sistema tales enzimas sí pueden reaccionar con la MO afluente, dado que la estabilización del lodo se realiza en un reactor cuyo efluente es puesto en contacto con el AR afluente.

Entre los años 70 y 90, a través de estudios científicos se desarrollan las principales bases teóricas para el diseño y aplicación de esta tecnología para el tratamiento del ARD, principalmente para la reducción de materia orgánica carbonácea y nitrogenada.

Gujer y Jenkins (1975a) desarrollaron estudios para determinar la tasa de consumo de oxígeno, producción de lodos y eficiencia de esta configuración de lodos activados para reducir MO carbononacea. Un aspecto interesante de esta investigación se relaciona con los efectos adversos que producen las temperaturas bajas (ej. 11ºC) sobre el desempeño de este sistema, principalmente por la influencia de la temperatura sobre la actividad biológica y la composición microbiana del lodo activado, siendo la producción de lodos y la tasa de consumo de oxígeno las variables que principalmente son afectadas.

Gujer y Jenkins (1975b) complementaron el estudio anterior con la determinación de la cinética y oxidación del amonio en un SLAEC. El desarrollo de este modelo sugirió que sin la adición de una fuente externa de carbono en esta modalidad de lodos activados, se puede desarrollar un proceso nitrificación con eficiencias entre 30 y 80%.

Orhon et al. (1977) propusieron un modelo cinético y un procedimiento de diseño para el SLAEC, asumiendo que solo la materia orgánica soluble era metabolizada en el RC y que la materia orgánica particulada era transformada en el RE.

Khararjian y Sherrard (1978) investigaron a escala laboratorio el comportamiento de las variables involucradas con la reducción de MO coloidal en un SLAEC. Encontrando que en el RC la reducción de DQO es inversamente proporcional al TRH y que las altas velocidades con las que se reduce la MO en este reactor, no tiene efectos adversos sobre las características de sedimentabilidad del lodo.

Posteriormente, Alexander et al. (1980) incorporaron el modelo cinético general de lodos activados propuesto por Dold et al. (1980) citado por Alexander et al. (1980), determinaron que eran cinco las variables independientes que gobernaban el SLAEC: *TRC, porcentaje de recirculación de lodo, Factor α, COV y SSVLM*. En un sistema a escala laboratorio observaron marcadas diferencias en la concentración de la DQO filtrada y no filtrada en el efluente, aspecto que relacionaron con deficiencias en la floculación y entrampamiento de la fracción particulada en el RC.

Eckenfelder (1986) patentó un SLAEC para el tratamiento de AR con alta concentración de DBO_5 soluble, en la cual especificaba que un TRH en el RC entre 5 y 20 min era suficiente para absorber el 90% de la DBO_5 soluble del AR. Anotó que un TRH_{RC} mayor a 40 min, no aumentaba significativamente la reducción de DBO_5. Así mismo, empleó separadores tipo DAF para promover una mejor separación de la fase sólida – líquida con TRH entre 20 y 40 min.

Sarioglu et al. (2003) desarrollaron un procedimiento de diseño para modelar la reducción de MO en el SLAEC, aplicando el modelo cinético ASM1 y asumiendo que la degradación de la MO particulada es similar a la del sustrato lentamente biodegradable. De esta investigación se derivaron las ecuaciones de diseño que actualmente se aplican para esta modalidad.

Dentro de las aplicaciones a escala real de esta tecnología, resaltan la PTAR ubicada en el noreste del Distrito Sanitario Urbana-Champaign (Estados Unidos), conformada por una unidad de tratamiento primario y dos unidades de tratamiento secundario: SLAEC y filtro percolador. La PTAR opera con un caudal de 660 $L.s^{-1}$, una DBO_5 afluente de 150$mg.L^{-1}$, TRC de 3.5d, con estas condiciones se favorece una relación A/M de 0.2 DBO_5.$(mg\ SSV.d)^{-1}$ y mantiene una concentración de SSVLM en el RC de 1100 $mg.L^{-1}$, 4.500 $mg.L^{-1}$ en RE y 5.000 $mg.L^{-1}$ en la recirculación (Oerther et al., 2001).

Figueroa y Quintero (1994) estudiaron a escala piloto la eficiencia en reducción de carga orgánica, utilizando como afluente el ARD de la Ciudad de Cali, que era transportada a través del Colector Central. Para un ARD con concentraciones de DQO, DBO_5 y SST iguales a 353, 218 y 162 $mg.L^{-1}$ en periodo seco y con 106, 66 y 66 $mg.L^{-1}$ en periodo lluvioso respectivamente, recomendaron que el SLAEC operara con TRC de 6.5 d y relación A/M de 0.57 kg DBO_5.$(kg\ SSVLM.d)^{-1}$, para estas condiciones las eficiencias observadas en la reducción de DQO, DBO_5 y SST fueron 81%, 82 y 83% respectivamente.

En asocio con la Universidad del Valle, EMCALI EICE a partir del año 2005 inició investigaciones a escala de laboratorio y piloto para determinar parámetros de diseño y operación para el SLAEC como alternativa para el tratamiento secundario del ARD del Municipio de Cali. A escala de laboratorio, se evaluó la factibilidad de aplicación de esta tecnología, empleando el efluente primario

de la PTAR-C; a través de la variación de las condiciones operacionales, EMCALI-UNIVALLE (2006) encontraron que con TRH_{RC} de 1.7h, TRC de 10 d y tasa de recirculación de lodos de 33.7%, era posible alcanzar eficiencias de eliminación de DBO_5 y SST de 96 y 86% respectivamente; sin embargo, con sobre cargas hidráulicas del 70% en la cual el TRH_{RC} se disminuía hasta 0.5 h, se presentó lavado de la biomasa del sistema señalando de este modo el límite de operación de esta tecnología para la calidad del efluente primario de la PTAR-C, el cual presentó concentraciones de DBO_5 y SST iguales a 163 y 80mg.L^{-1} respectivamente.

Más adelante, Vásquez et al. (2011) evaluaron un SLAEC a escala piloto, variando el TRH entre 0.84 y 1.66h y porcentaje de recirculación de lodo entre 40 y 100%; encontraron que para el tratamiento secundario del efluente primario de la PTAR-C con concentraciones promedio de DBO_5 y SST de 231 y 83mg.L^{-1} en el afluente, el SLAEC puede alcanzar eficiencias de eliminación de carga contaminante de DQO, DBO_5 y SST de 86, 87 y 82%, respectivamente, este nivel de eficiencia se obtuvo con TRC de 6d, COV de 2.13 kg DBO_5.(m^3.d)$^{-1}$, A/M de 0.89 kg DBO_5.(kg SSV.d)$^{-1}$ y SSVLM de 1.125 mg.L^{-1} en RC y 3.173 mg.L^{-1} en RE.

Con relación a las transformaciones cinéticas del sustrato soluble que tiene lugar en el SLAEC, Paz (2009) a escala piloto y empleando el efluente primario de la PTAR-C, encontró valores de 0.31mg DQO.Biomasa.mgDQO.Sustrato^{-1} y 0.51d^{-1} para las constantes de rendimiento (Y_H) y crecimiento (μ_H) respectivamente. Aunque estos valores fueron relativamente bajos frentes a los observados en la literatura para otros SLA, el autor relacionó estos resultados con las características del ARD y la configuración propia del SLAEC, ya que un sustrato diluido con concentraciones de DBO_5 de 110±44mg.L^{-1} dentro de un sistema en el que prevalecen las reacciones de bioadsorción en el RC, donde fueron determinadas estas constantes, no permite describir adecuadamente la cinética de rendimiento y crecimiento de los microorganismos, dejando planteado que la determinación de estos coeficientes cinéticos en este sistema debe incluir la transformación del sustrato que tiene lugar dentro del RE, en el cual las tasas de rendimiento y crecimiento deben ser mayores gracias a la configuración del SLAEC.

Recientemente, Mardani et al. (2011) usando ARD afluente a la PTAR Esfahan South (Irán) determinó a escala piloto, los coeficientes cinéticos para tres SLA incluyendo el SLAEC. Encontraron que los valores de los coeficientes cinéticos varían significativamente con el incremento de los SSVLM. El valor del coeficiente de crecimiento (Y) en el SLAEC disminuyó de 0.713 a 0.632 mg SSV.(mg DQO)$^{-1}$, a medida que la concentración de SSVLM en el RC se incrementó de 2.000 mg.L^{-1} a 3.000 mg.L^{-1}. De acuerdo con el autor, la producción de lodos es menor cuando la concentración de SSVLM en el RC es mayor, lo cual podría explicar el comportamiento de las constantes cinéticas, ya que bajo estas mismas condiciones operacionales, para este sistema, la tasa de crecimiento específico (μ_{max}) disminuyó de 0.42 a 0.23 d^{-1}.

3.4.2 Sistemas de lodos activados sin clarificación primaria

La investigación realizada a escala piloto por Ullrich y Smith (1951), sobre un proceso que denominaron biosorción ó de alta tasa sentó las bases para el desarrollo del SLAEC, especialmente

para AR sin clarificación primaria. Con TRH_{RC} entre 15 y 30 min alcanzaron eficiencias de eliminación de DBO_5 y SST de 90 y 95% respectivamente; mientras que con un TRH_{RE} de 90 min restablecieron la capacidad adsortiva del floc biológico antes de ser retornado al RC. La producción de lodos de ese sistema fue similar a la observada en SLAC; los autores dejaron planteada la posibilidad de realizar purga de lodos del sistema desde el RE al mantener un porcentaje de recirculación de 100% desde el sedimentador secundario, con lo cual se generó un lodo mas estabilizado con menores requerimientos para su tratamiento y disposición posterior.

Ullrich y Smith (1957) reportan la experiencia observada cuando la PTAR de Austin – Texas (Estados Unidos) fue convertida a un proceso de biosorción (SLAEC). La nueva configuración de la PTAR permitió incrementar el caudal tratado desde 262 $L.s^{-1}$ hasta 700 $L.s^{-1}$. También eliminó los problemas relacionados con la formación de lodo filamentoso. Un aspecto interesante que reportaron los autores, fue la presencia de espuma grasosa en la superficie del RC, evento que no presentó dificultades para la operación del sistema, pero que se hizo importante cuando en el afluente se sumaba la presencia de sustancias químicas en concentraciones tóxicas.

Posteriormente, Schultz et al. (1982) evaluaron la producción de lodos en 16 PTAR con SLA sin clarificación primaria; en promedio la DBO_5 y SST en el efluente de las PTAR evaluadas fue 13 y 15 $mg.L^{-1}$ respectivamente. Usando los registros de dos años para cada sistema, estimaron un coeficiente de producción de lodos que relacionó la masa de SST producida con la masa de DBO_5 removida, obteniendo un valor promedio de 0.86 kg SST.(kg $DBO_{5\ removida})^{-1}$. Los SLAC y SLAEC presentaron la mayor producción de lodos con un valor 1.22 kg SST.(kg $DBO_{5\ removida})^{-1}$, mientras que la menor producción de lodos estuvo asociada con los SLA de aireación extendida con 0.60 kg SST.(kg $DBO_{5\ removida})^{-1}$. Los autores relacionaron los valores obtenidos con el TRC, relación A/M, COV y TRH, pero no hallaron una clara correlación estadística entre estas variables y la producción de lodos en SLA sin clarificación primaria; pese a lo anterior, resaltaron la importancia que adquiere la relación DBO_5/SST en la producción de lodos cuando no existe la clarificación primaria, ya que el incremento por paso de sólidos al sistema podría ser hasta del 35%.

Chudoba y Tucek (1985) reportaron que en los SLA sin clarificación primaria, la eliminación de impurezas del AR y su descomposición aerobia ocurren simultáneamente en los tanques de aireación. La biomasa es sintetizada a partir de MO soluble e insoluble ó particulada; los sólidos en suspensión no biodegradables ó inertes se acumulan en el sistema, por lo tanto, los SSTLM del tanque de aireación son una mezcla de biomasa y sólidos suspendidos inertes. Los autores advierten que para describir cinéticamente esta configuración, se deben realizar separadamente balances de masa y sólidos suspendidos primarios ó sólidos sedimentables. En ejemplos de algunos SLA sin clarificación primaria mostraron que la producción esperada de lodos de exceso varían entre 0.6 y 0.8 kg SST. kg DBO_5 eliminada.

Eckenfelder (1990) estimó matemáticamente el requerimiento de oxigeno y producción de lodos como parámetros dependientes del TRC para un SLA, con y sin clarificación primaria. Para TRC entre 3 y 10 d, el consumo de oxígeno en un SLA sin clarificación primaria fue 25% mayor al requerido en un SLA con clarificación primaria, sin embargo, la producción de lodos para el primer sistema fue menor en comparación con el segundo, con una diferencia del 25%; con TRC mayores

(entre 10 y 30d) los requerimientos de oxígeno para el sistema sin clarificación primaria excedieron en 40% al otro sistema, pero la producción de lodos no disminuyó en igual magnitud como en el caso anterior, solo se presentó una diferencia de 29% entre los dos sistemas; de esta manera no hubo compensación entre el requerimiento de oxígeno y la producción de lodos cuando los TRC fueron altos en SLA sin clarificación primaria.

A escala real se encuentra una pequeña PTAR que opera como un SLAEC y trata el agua residual de todos los edificios, cafeterías, restaurantes y algunos laboratorios de la Universidad de Birzeit (Palestina), la unión de los efluentes genera un caudal de 0.70 $L.s^{-1}$, con las siguientes características: DBO_5: 220 $mg.L^{-1}$, DQO: 488 $mg.L^{-1}$ y SST :300 $mg.L^{-1}$. Al-Sa'ed y Zimmo (2004) evaluaron el desempeño de esta PTAR durante dos años, encontrando que a pesar de las variaciones en la calidad del AR producto de los periodos estacionales, la concentración de DQO efluente fue menor a 110 $mg.L^{-1}$ y la eficiencia de reducción de DQO y SST fue del 85%.

Bolzonella (2005) evaluó el desempeño de cuatro PTAR en Italia, en las cuales se eliminó la clarificación primaria para preservar la materia orgánica carbonacea, con el fin de llevar a cabo la eliminación biológica de Nitrógeno y/o Fósforo. Tres de las cuatro PTAR operaban como un SLA bajo un proceso denominado D-N (pre-denitrificación / nitrificación), mientras que la cuarta PTAR, para reducir la materia orgánica carbonacea y nitrogenada empleaba dos procesos: el proceso Carrusel®, en tres tanques que operaban en paralelo, y un proceso de ciclos alternados® controlado de forma automática. El caudal de tratamiento, relación A/M y el TRH de las tres primeras PTAR varió entre 1.6 y 0.3 $m^3.s^{-1}$, 0.3 y 0.05 kg DQO.$(kg\ SSVLM.d)^{-1}$ y 35 a 8 d, respectivamente. Para la cuarta PTAR, el valor de estos parámetros de operación fueron 0.12 $m^3.s^{-1}$, 0.02 kg DQO.$(kg\ SSVLM.d)^{-1}$ y 45 d. Esta última PTAR, que recibió menor carga orgánica reportó eficiencias de reducción de DQO y SST de 94 y 91 % respectivamente. Mientras que la eficiencia de reducción de DQO y SST en las otras PTAR fue entre 84 y 87% respetivamente. Estos resultados evidenciaron que aún sin la clarificación primaria los SLA alcanzan altas eficiencias de reducción de DQO y SST.

Puig et al. (2010) evaluaron a escala real el efecto de la clarificación primaria sobre la eficiencia en la reducción de nutrientes en una PTAR. Los resultados mostraron que la ausencia de la clarificación primaria no mejoró la calidad del efluente, ni tuvo efectos significativos sobre la reducción de nutrientes, pero incrementó la relación C:N:P debido a la presencia de compuestos particulados que ingresan al sistema biológico en ausencia de la clarificación primaria.

3.4.3 Modificaciones del SLAEC

Algunas modificaciones al diseño original del SLACE se han propuesto principalmente para optimizar la capacidad de los SLA en PTAR existentes; la PTAR del Rosendale ubicada en el condado de Ulster, Nueva York, con un caudal máximo de 2.7$m^3.s^{-1}$ operó desde 1981 con dos líneas de tratamiento en paralelo bajo la modalidad de aireación extendida (SLA-AE) sin clarificación primaria; en el año 2004 cuando la PTAR estaba a punto de sobrepasar el 100% de su capacidad máxima de diseño, se evaluó en una de las líneas de tratamiento el proceso de Estabilización por Contacto con Selector (SCS), como una alternativa para aumentar la capacidad y optimizar el tratamiento del AR;

este sistema divide el RC en zonas o compartimientos a través de la implementación de tabiques, en la primera de éstas, una alta relación A/M mantiene condiciones anóxicas en el medio para que sólo por el mecanismo de adsorción el carbono orgánico del afluente sea rápidamente adsorbido por los microorganismos recirculados desde el RE (NYSERDA, 2005).

Los principales beneficios que se observaron con esta modificación estuvieron relacionados con una mayor capacidad de tratamiento de AR sin construcción de nuevas estructuras, el SCS trato 24% más de caudal y carga que el SLA-AE. La DBO_5 en el efluente fue de 21 y 17 $mg.L^{-1}$ para el SCS y SLA-AE respectivamente, estos valores estuvieron asociados a porcentajes de eliminación de DBO_5 de 88 y 90%, en el mismo orden; en la eliminación de SST se presentó un mejor desempeño del SCS con un 90%; mientras que en el SLA-AE fue de 81%, esta diferencia estuvo relacionada con una mayor estabilidad del primer sistema en torno a la decantación de los lodos activados en el sedimentador secundario. De otro lado, se presentó un ahorro en costos energéticos, ya que el proceso SCS consumió 30% menos de energía que el proceso SLA-AE (NYSERDA, 2005).

3.5 CONSIDERACIONES FINALES

El SLAEC es una modificación del SLAC que fue aplicada hace más de 80 años, desde sus inicios fue concebido como una modalidad que podía tratar eficientemente el AR eliminando la clarificación primaria, sin embargo, no hay experiencias documentadas que evalúen el comportamiento de las PTAR que operan bajo esta condición.

Por lo anterior, es claro que eliminar la clarificación primaria en el tratamiento del ARD no es una idea nueva, sin embargo, los efectos que se derivan de esta modificación no han sido continuamente evaluados, dejando un vacío a nivel científico. Por otro lado, los estudios a escala piloto que se han realizado en la Ciudad de Cali, evaluando el SLAEC como alternativa para el tratamiento del efluente primario de la PTAR-C, han mostrado que el ARD afluente a la PTAR-C tiene características que la clasifican como diluida o de baja concentración y que la clarificación primaria retira materia orgánica del AR, acentuando las características de baja concentración.

Es en este sentido donde esta evaluación cobra importancia, tanto por la falta de información a nivel científico como por el efecto que pueden tener estos resultados para la Ciudad de Cali, dado que esta modalidad del SLA se ha perfilado como la opción más viable para el tratamiento del ARD de esta Ciudad.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO

La fase experimental se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la PTAR-C, ubicada al nor-oriente de la Ciudad de Santiago de Cali, en el Barrio Petecuy. La determinación de las variables fisicoquímicas se realizó en el laboratorio central de la PTAR-C y en el Laboratorio de Biotecnología Ambiental de la Universidad del Valle, sede Meléndez. En la Figura 4.1 se presenta un esquema con la ubicación geográfica del proyecto.



Figura 4.1 Ubicación geográfica del proyecto

4.2 UNIDAD EXPERIMENTAL

Se consideró como unidad experimental el AR afluente y la biomasa activa dentro del sistema (SSVLM), estos dos elementos se mezclaron dentro de las unidades de la planta piloto de lodos activados.

4.2.1 Agua residual afluente a la planta piloto

La planta piloto fue alimentada con una fracción del AR afluente a la PTAR-C, tomada en la cámara de integración de caudales sin ningún pre tratamiento (sin desarenación ni adición de químicos). La captación del AR se realizó a través de una bomba sumergible (Figura 4.2 a), ubicada en el fondo de la cámara de integración de caudales a través de una de las ventanillas de acceso, localizadas en el segundo piso del Edificio de Bombeo de la PTAR-C. A través de una tubería de Ø 1 ¾" PVC, se succionaba el AR desde este punto (Figura 4.2 b) y era impulsada a través de una tubería de Ø 3"

PVC hasta un tanque de almacenamiento ubicado sobre la plataforma externa de la cámara de integración de caudales (Figura 4.2 c). Desde este tanque, el AR parcialmente desarenada era conducida a gravedad a través de una tubería de Ø2" PVC, hasta los desarenadores de la planta piloto (Figura 4.2 d).



(a) Bomba sumergible (b) Succión e impulsión (c) Almacenamiento del AR (d) Conducción del AR

Figura 4.2 Flujo de toma y conducción del agua residual afluente a la planta piloto

En el tanque de almacenamiento, con capacidad de 1.0 m^3, se instalaron dos tamices en malla plástica para retener material grueso como hojas, bolsas, palos entre otros, que se encontraban en el AR. El tamiz grueso con aberturas de 4.0 cm^2 y el tamiz fino con aberturas de 0.09 cm^2. El TRH de 5.0 min en este tanque, permitía la retención de arenas ó desarenación parcial del AR, la evacuación de arenas acumuladas en el fondo de esta unidad se realizaba a través de una válvula Ø2" conectada a una tubería de igual diámetro. Las actividades de mantenimiento relacionadas con esta etapa se realizaron con una frecuencia de 2 veces por día, las cuales consistían en retirar sólidos retenidos en los tamices y la purga de arenas (Figura 4.3).



(a) Retención de sólidos gruesos (b) Purga de arenas

Figura 4.3 Dispositivos para remover sólidos gruesos del agua residual antes del ingreso a la planta piloto

4.2.2 Descripción de la planta piloto

La planta piloto era una estructura metálica compacta, compuesta por unidades que permitieron simular el tratamiento preliminar, primario y secundario del AR. En la Figura 4.4 se presenta un esquema de la distribución de las unidades de la planta piloto.

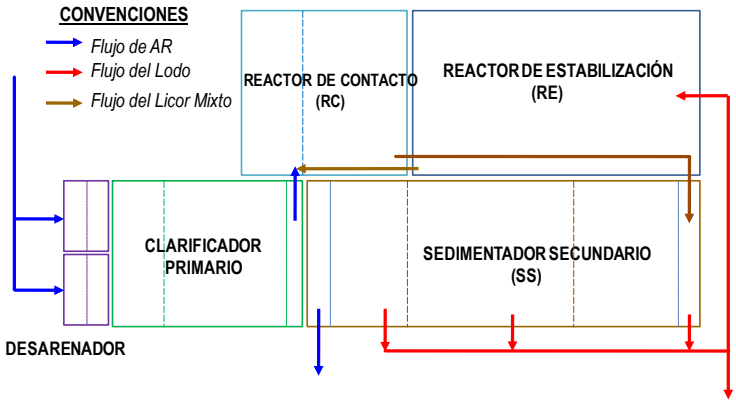


Figura 4.4 Esquema de la distribución de las unidades de la planta piloto

El tratamiento preliminar se realizó en dos desarenadores de igual magnitud, operando en paralelo; el tratamiento primario se realizó en un clarificador rectangular, y el tratamiento secundario en un reactor de contacto (RC), un reactor de estabilización (RE) y un sedimentador rectangular, las tres últimas unidades conforman el SLAEC. Las dimensiones de las unidades mencionadas se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Dimensiones de las unidades de la planta piloto

Unidad	Cantidad	Largo (m)	Ancho (m)	Altura útil (m)	Pendiente (%)	Volumen Útil (m^3)
Desarenador	2	1.20	1.30	2.2	5	0.88
Clarificador Primario (CP)	1	1.50	0.9	2.2	7	3.60
Reactor de Contacto (RC)	1	1.45	0.77	1.78	-	1.98
Reactor de Estabilización (RE)	1	2.80	0.77	1.86	-	4.53
Sedimentador Secundario (SS)	1	3.70	0.90	1.66	7.5	5.43

4.2.3 Desarenador de la planta piloto

El AR doméstica proveniente del tanque de almacenamiento ingresaba a las unidades de desarenación. A través de válvulas en la tubería afluente se regulaba el caudal de entrada. Esta unidad estaba compuesta por dos compartimentos que operaban en paralelo. Con un TRH de 25 min, retenían arena presente en el AR. Los desarenadores estaban conformados por dos cámaras separadas por un bafle que obligaba al AR a descender y ascender para continuar su flujo hacia la siguiente unidad, este mecanismo contribuyó con la retención de sólidos y flotantes. En el fondo de estas unidades estaban dispuestas válvulas para efectuar la purga de arenas, esta actividad se realizaba con una frecuencia de dos veces al día. En la Figura 4.5 se ilustran los desarenadores de la planta piloto.



(a) Vista superior (b) Vista frontal

Figura 4.5 Desarenadores de la planta piloto

4.2.4 Clarificador primario de la planta piloto

Esta unidad era un tanque rectangular contiguo a los desarenadores, con paredes inclinadas, provisto de válvulas en el fondo para efectuar la purga del lodo primario y una canaleta superior, para conducir hacia el reactor de contacto el agua clarificada ó efluente primario (EP). En el fondo de esta unidad con una pendiente de 7.0% contraria al flujo, estaba instalada una tubería perforada para permitir la recolección del lodo primario; las purgas de este lodo se efectuaban con una frecuencia de 2 veces por día. Por acción de la gravedad, en un tiempo de 1.4 h se efectuaba la decantación de los sólidos sedimentables. En la Figura 4.6 se ilustra esta unidad.



(a) Entrada ARd (Fase II)I (b) Purga de lodo primario (Fase II)

Figura 4.6 Clarificador primario

4.2.5 Reactor de Contacto (RC)

En el reactor de contacto (RC) se mezclaba el AR con el licor mixto recirculado desde el reactor de estabilización (RE); ésta mezcla se mantenía en suspensión gracias a la inyección ó suministro de aire, la cual cumplió una doble función: promover la mezcla del AR con el licor mixto y suministrar

oxígeno en cantidad suficiente para favorecer un ambiente aerobio dentro de los tanques de aireación (RC y RE).

El suministro de aire se realizaba a través de una derivación tomada del sistema de aireación principal que lleva aire hasta los desarenadores de la PTAR-C. Sobre la tubería principal se instaló una válvula de control para suspender o regular el suministro de aire que ingresaba a la planta piloto.

El RC era una unidad rectangular provista de una pantalla ó tabique que la dividía en dos cámaras, obligando el paso inferior de una unidad hacia otra, de esta manera se favorecería el contacto en el nivel superior entre AR ó EP con el licor mixto recirculado desde el RE. En el fondo de cada una de éstas cámaras estaba ubicado un difusor de membrana perforada tipo disco de 8" de diámetro; el caudal de aire que ingresaba a cada cámara era controlado a través de un válvula localizada en la parte superior, ello permitió independizar y graduar la concentración de oxigeno disuelto (OD) en cada cámara. En la Figura 4.7 se ilustra el funcionamiento de esta unidad.



Figura 4.7 Reactor de Contacto

Después de un tiempo de contacto de 51 minutos (0.84h), el licor mixto de esta unidad era conducido a través de una tubería de 2.5 pulgadas hasta el sedimentador secundario.

4.2.6 Sedimentador Secundario (SS)

En un sedimentador rectangular se realizaba la separación de la fase sólida y liquida del licor mixto proveniente del RC. Esta unidad estaba provista de bafles y pantallas que mejoraban la distribución de flujo y permitían la acumulación del lodo. Un bafle en acrílico, sumergido 5.0 cm dividía al sedimentador secundario en dos cámaras. A la primera cámara, llegaba el licor mixto proveniente del RC y por medio de una canaleta transversal con orificios en el fondo se distribuía el flujo; en el sentido del flujo, a 1.22 m se encontraba una pantalla sumergida 1.20 m, cuyo objetivo era disminuir la velocidad del flujo para favorecer las sedimentabilidad del floc. En esta cámara, sedimentaba el floc con mejores características de sedimentabilidad; el floc más fino ó con pobres características de sedimentabilidad era arrastrado hasta la segunda cámara, en la cual, previo a la canaleta de salida, estaba instalada una pantalla (lámina) que facilitaba la retención de flotantes y forzaba al agua a

descender para evitar que se deteriorara la calidad del efluente tratado. En la Figura 4.8 se ilustra el funcionamiento de esta unidad.

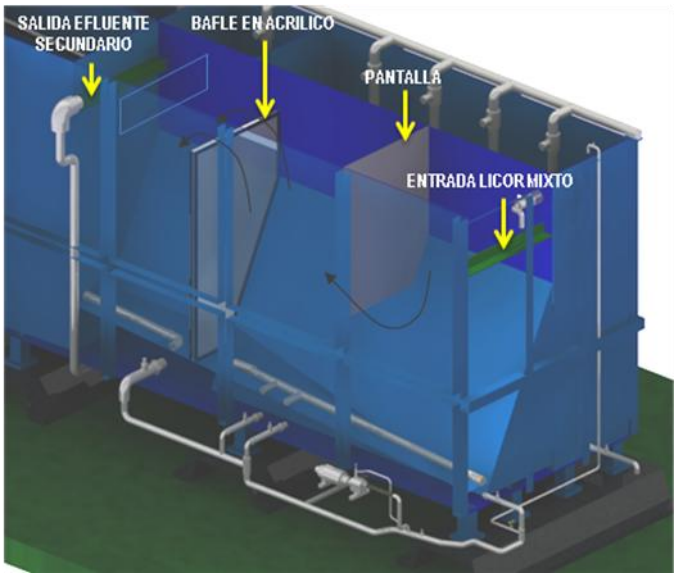


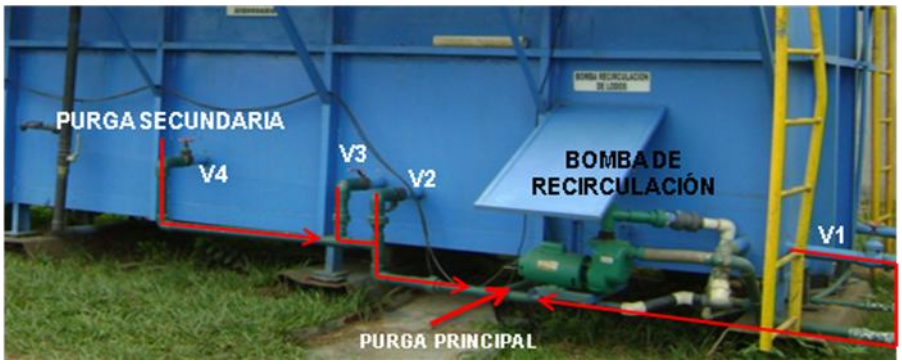
Figura 4.8 Sedimentador Secundario

Una de las caras longitudinales del sedimentador tenía una inclinación para permitir la decantación del lodo. En ausencia de un barrelodos mecánico, esta actividad se hacía manualmente una vez cada hora. El efluente clarificado, en este caso denominado efluente secundario (ES) era recolectado a través de una canaleta transversal.

4.2.7 Purga y recirculación de lodo secundario

El fondo del sedimentador secundario tenía una pendiente de 7.5% en sentido contrario a la dirección del flujo, para facilitar la concentración del lodo, el cual se recolectaba a través de una tubería de 1" de diámetro con perforaciones. En la primera cámara, había tres válvulas para controlar la purga de lodo, la interconexión externa de estas válvulas (V1, V2 y V3) se constituyó en la "purga principal"; de acuerdo con los requerimientos de caudal a purgar para controlar el TRC, se graduaba la apertura de las válvulas. De la segunda cámara, con el mismo sistema (tubería perforada y válvula) se purgaba el lodo que por sus pobres características de sedimentabilidad se había acumulado en esta cámara, este punto de purga de lodo se denominó "purga secundaria".

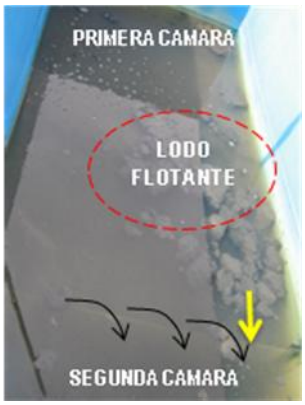
Adicional a los puntos de purga anteriores, también se retiraba de forma manual, lodo de la superficie de la primera cámara del sedimentador secundario. Entre el canal de entrada y la pantalla sumergida, se acumulaba lodo con características de "espuma" y después de la pantalla, se retiraba lodo que por sus bajas características de sedimentabilidad "flotaba" en la superficie del sedimentador. La ubicación de los cuatro (4) puntos de purga de lodo se ilustran en la Figura 4.9.



(a) Purga principal y secundaria



(b) Espuma



(c) Lodo flotante

Figura 4.9 Purga de lodo secundario

Una fracción del lodo concentrado en la primera cámara del sedimentador secundario era recirculado hacia el RE; esta actividad se hacía de forma continua utilizando una tubería de 1/2" de diámetro conectada a una bomba de recirculación. A través de una válvula de bola se regulaba el caudal de recirculación, de tal forma que este correspondiera al 40% (0.29 $L.s^{-1}$).del caudal de AR afluente

4.2.8 Reactor de Estabilización (RE)

El lodo recirculado desde el sedimentador secundario era conducido hasta el reactor de estabilización (RE), en el cual a través de la inyección de aire y en un TRH_{RE} de 4.11 h se favorecía la transformación del material orgánico que había sido adsorbido y acumulado en el floc biológico, en el RC. Esta unidad de forma rectangular, estaba provista de cuatro difusores de membrana perforada tipo disco de 8" de diámetro, conectados al sistema de aireación principal, descrito en el ítem 4.25.

A este reactor solo ingresaba una fracción del lodo concentrado que era recirculado desde el sedimentador secundario. El efluente de esta unidad, en su totalidad era conducido a través de un orificio de 2" de diámetro hasta la primera cámara del RC, en el punto de ingreso del AR. En la Figura 4.10 se ilustra el funcionamiento de esta unidad.



(a) Reactor de estabilización y recirculación



(b) sistema de aireación

Figura 4.10 Reactor de Estabilización

4.3 FASES DE EVALUACIÓN

La investigación se dividió en dos (2) fases experimentales para determinar la incidencia de la clarificación primaria del agua residual (AR) sobre el desempeño del SLAEC. El acondicionamiento previo del AR afluente al sistema biológico fue la variable que cambió en cada fase:

FASE I.	SLAEC alimentado con agua residual desarenada (ARd)
FASE II.	SLAEC alimentado con el efluente del clarificador primario (EP)

El término de agua residual desarenada (ARd), hace alusión a aquella que recibió tratamiento preliminar, básicamente desarenación, mientras que el efluente primario (EP) corresponde al agua residual sometida a tratamiento preliminar y primario. En ambos casos, los pretratamientos se llevaron a cabo dentro de las unidades de la planta piloto.

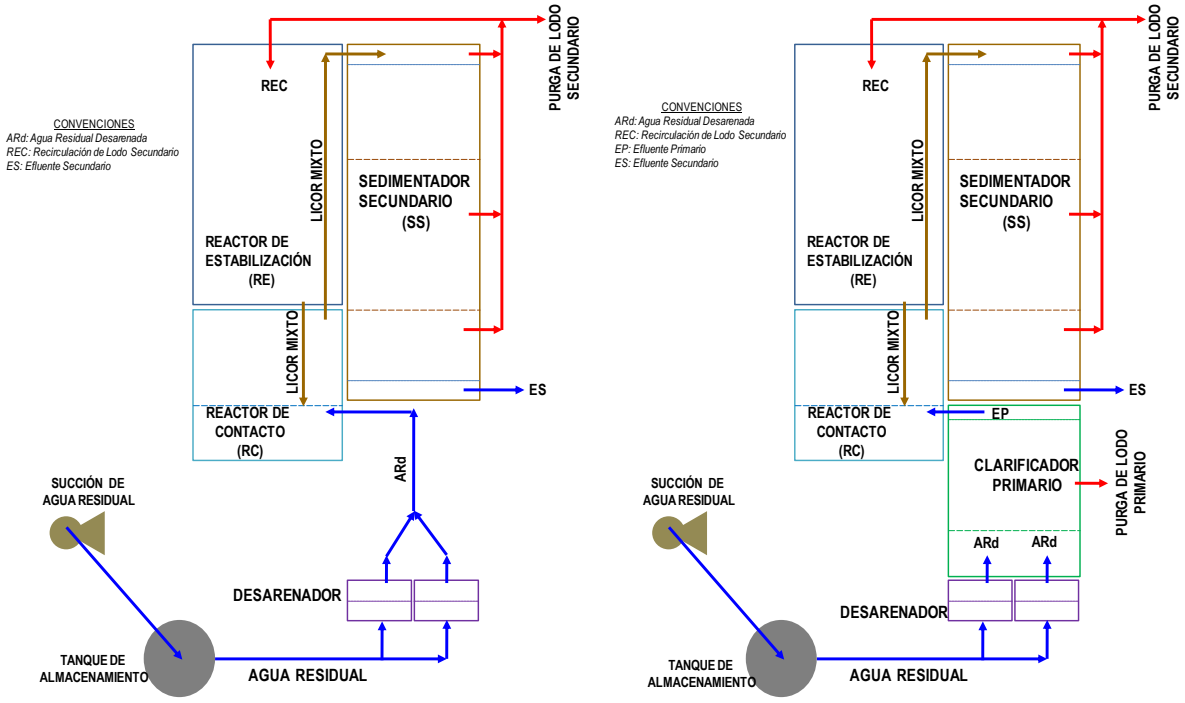
Durante la Fase I, para evitar la clarificación primaria del ARd se instalaron dos tuberías de Ø1/2" PVCP desde la salida de los desarenadores hasta la canaleta de recolección del efluente clarificado (EP), para conducir el ARd directamente hacia el reactor de contacto. En la Figura 4.11 se presenta esta modificación.



(a) Fase I (b) Fase II

Figura 4.11 Flujo del agua residual desarenada (ARd) durante las fases de experimentación

La evaluación de las fases experimentales se realizó en diferentes periodos, seguido uno del otro. La FASE I tuvo una duración de 114 d, mientras que la FASE II se evaluó durante 66 d. La Figura 4.12 ilustra el diagrama de flujo de la planta piloto en cada fase de evaluación.



(a) Fase I (b) Fase II

Figura 4.12 Diagrama de flujo de la planta piloto

4.4 SEGUIMIENTO Y CONTROL OPERACIONAL DEL SISTEMA

4.4.1 Parámetros operacionales

Las condiciones bajos las cuales fue operado el sistema se presentan en la Tabla 4.2. Estos valores fueron definidos de acuerdo con los resultados obtenidos por Vásquez et al. (2011) quienes seleccionaron las condiciones óptimas para promover la reducción de materia orgánica carbonacea en un SLAEC tratando el efluente primario de la PTAR-C.

Tabla 4.2 Condiciones operacionales

Variable Operacional		Unidad	Valor
TRC		(d)	6.0
Caudal afluente		($L.s^{-1}$)	0.72
Recirculación de lodo		%	40
		$L.s^{-1}$	0.29
TRH	TPr.	(h)	0.68
	CP		1.39 (Fase II)
	RC		0.84
	RE		4.37
	SS		2.09
OD		$mgO_2.L^{-1}$	2±0.5

TPr: Tratamiento preliminar
CP: Clarificador primario
RC: Reactor de Contacto
RE: Reactor de Estabilización
SS: Sedimentador Secundario
TRC: Tiempo de retención celular
TRH: Tiempo de retención hidráulico
OD: Oxigeno disuelto

El cálculo del TRC se realizó empleando la Ecuación 4.1 propuesta por Rittman y McCarty (2001), en la cual se considera la concentración de biomasa en todo el sistema.

$$TRC = \frac{V_{RC}.X_{RC} + V_{RE}.X_{RE}}{Q_w.X_w + (Q - Q_w).X_E}$$ **Ecuación 4.1**

Donde:
V_{RC} = Volumen del reactor de contacto
V_{RE} = Volumen del reactor de estabilización
Qw = Caudal de purga del lodo
Q-Qw = Caudal efluente (no se consideran perdidas por evaporación por lo cual el caudal efluente es igual al caudal afluente)
X_{RC} = SSVLM del reactor de contacto
X_{RE} = SSVLM del reactor de estabilización
Xw = SV del lodo de purga
X_E = SSVLM del Efluente Secundario

4.4.2 Variables de control y desempeño del sistema

El desempeño del sistema se evaluó a través de la medición de las variables fisicoquímicas, tanto en el AR (Afluente y Efluente) como en el lodo y el licor mixto. Las variables caracterizadas, la frecuencia y el método de medición se presentan en la Tabla 4.3 y 4.4. Todos los análisis fisicoquímicos se llevaron a cabo de acuerdo con los métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual (APHA et al., 2005).

Tabla 4.3. Variables fisicoquímicas para el control del sistema

Punto de muestreo	Variable	Unidades	Frecuencia	Método
ARd, EP,ES, licor mixto y purga de lodo	pH	Unidades	Diaria	4500 H^+
	Alcalinidad total	mg $CaCO_3.L^{-1}$	Diaria	2320 B
Licor Mixto	OD	$mg.L^{-1}$	4 / día	4500 O
	Temperatura	ºC	Diaria	2550 B
ARd, EP y ES	Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)	mg $NAT.L^{-1}$	1 /quincenal	4500 NH_3
	Ortofosfatos	mg $PO_4.L^{-1}$	1 / quincenal	4500 P
Licor mixto (RC y RE), Recirculación y purga de lodo	Sólidos (ST, SSV)	$mg.L^{-1}$	Diario	2540 D 2540 E

Tabla 4.4 Variables fisicoquímicas para medir el desempeño del sistema

Punto de muestreo	Variable	Unidades	Frecuencia	Método
ARd, EP y ES	DQO total	$mg.L^{-1}$	3 / semana	5220 C
	DQO filtrada	$mg.L^{-1}$	3 / semana	5220 C
	DBO_5 total	$mg.L^{-1}$	1 / semana	5210 B
	Sólidos (SST)	$mg.L^{-1}$	3 / semana	2540 D

4.4.3 Puntos de muestreo y toma de muestra

Para controlar el funcionamiento del sistema se establecieron diez puntos de muestreo:

a) ***Punto de muestreo 1: Afluente al sistema biológico.*** En la Fase I el afluente al sistema biológico fue el ARd, mientras que durante la Fase II, el EP fue considerado como el afluente al sistema biológico (Ver Figura 4.13).



Fase I Fase II

Figura 4.13 Punto de muestreo 1. AR afluente al sistema biológico

b) ***Punto de muestreo 2: Afluente al Clarificador Primario.*** La inclusión de la clarificación primaria durante la Fase II, generó que el ARd se constituyera como el afluente al clarificador primario.

c) ***Punto de muestreo 3: Efluente Secundario.*** El AR tratada que abandonaba el SS fue considerado en las dos fases experimentales como el efluente del sistema, denominado efluente secundario (ES) (ver Figura 4.14).



Figura 4.14 Punto de muestreo 3. Efluente Secundario

d) ***Punto de muestreo 4 y 5: Licor Mixto del Reactor de Contacto y Reactor de Estabilización.*** El licor mixto de la segunda cámara del RC y el licor mixto del RE (centro), se constituyeron en la biomasa del sistema (Ver Figura 4.15).



Punto de Muestreo 4



Punto de Muestreo 5

Figura 4.15 Punto de muestreo 4 y 5. Licor Mixto

e) Punto de muestreo 6: Purga principal. El lodo purgado de la cámara principal del sedimentador secundario, a través de las válvulas V1, V2 y V3 se consideró como el punto de purga de lodo principal (Ver Figura 4.16).



(a) Ubicación de tubería de salida de lodo purgado



(b) recolección en canecas plásticas del lodo purgado



(c) Muestra compuesta para con volúmenes iguales de lodo de cada las caneca



(d) Recolección de la Muestra 6

Figura 4.16 Punto de muestreo 6. Purga principal

f) ***Punto de muestreo 7: Purga Secundaria.*** El lodo purgado de la segunda cámara del sedimentador secundario, cuando la únicamente la válvula V4 estaba abierta se considera como la purga secundaria. La recolección de esta muestra se realizó de la misma forma que se recolectó la muestra de lodo principal.

g) ***Punto de muestreo 8 y 9: Espuma y Flotante***. Estos puntos de purga estaban asociados a las espumas y flotantes que se formaban en la superficie del sedimentador secundario y arrastraban lodo, el cual al ser retirado manualmente del sistema se constituía en pérdida o purga de lodo, necesario para controlar el TRC.

h) ***Punto de muestreo 10: Recirculación (REC).*** La recirculación de lodos desde el sedimentador secundario hacia el RE se constituyó en el punto de muestreo 10 (Ver Figura 4.17).



Figura 4.17 Recolección de muestra 10. Recirculación de lodo

La recolección de todas las muestras se realizó de forma puntal en horas de la mañana, entre las 9:00 y 11:00 am. Para esta actividad se emplearon recipientes plásticos, rotulados y previamente lavados. En el mismo orden que se presentaron los puntos de muestra se realizó la toma de la misma, con el propósito de evitar que la purga de lodo tuviese incidencia sobre la calidad el efluente.

Adicionalmente, se realizaron cuatro (4) muestreos de caracterización horaria en el afluente, tomando muestras puntuales cada dos (2) h durante un periodo de 24 h. Esta actividad se realizó para identificar la curva de variación horaria de la calidad de ARd. A cada muestra se le determinaron las variables fisicoquímicas presentadas en la Tabla 4.5.

4.4.4 Caracterización microscópica

Se realizaron observaciones en el microscopio de la microfauna presente en los reactores (RC y RE), para identificar los microorganismos predominantes en cada Fase. La identificación se realizó mediante microscopia óptica, tomando de cada reactor una muestra de 250 mL del licor mixto. La observación de microorganismos superiores como protozoos y metazoos consistió en advertir su presencia a nivel de género.

Tabla 4.5 Variables fisicoquímicas determinadas en los muestreos de variación horaria

Punto de muestreo	Variable	Unidades	Método*
ARd (Fase I y II) EP (Fase II)	pH	Unidades	4500 H^+
	Alcalinidad total	mg $CaCO_3.L^{-1}$	2320 B
	DQO total	$mg.L^{-1}$	5220 C
	Sólidos (SST)	$mg.L^{-1}$	2540 D

* APHA et al. (2005)

4.4.5 Evaluación de la calidad y cantidad de lodo generado

- **Calidad**

La calidad del lodo de purga se determinó a partir del contenido de sólidos (ST y SV) y de sus características de sedimentabilidad (IVL y VSZ). Los puntos de muestreo y el método analítico se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Variables fisicoquímicas para establecer la calidad del lodo generado

Punto de muestreo	Variable	Unidades	Frecuencia	Método*
Licor Mixto (RC y RE) y Purga de lodos	Sólidos (SST y SSV)	$mg.L^{-1}$	Diario	2540 D 2540 E
Licor Mixto (RC y RE)	IVL	$mg.L^{-1}$	Diario	2710 D
	IVLD	$mL.g^{-1}$	Diario	-
Purga principal	VSZ	$m.h^{-1}$	2 / Semana	2710 E

* APHA et al. (2005)

- **Cantidad**

La cantidad de lodo generado en cada una de las Fases se determinó a través del coeficiente de producción de lodos (P_x), el cual relaciona la carga de lodo de exceso con la carga de DQO eliminada. Matemáticamente se estimó empleando la Ecuación 4.2.

$$P_x = \frac{Carga\ \ lodo_{purgado}}{Carga\ \ DQO_{eliminada}}$$ Ecuación 4.2

Donde

P_x : coeficiente de producción de lodo (kg ST.(kg DQO $_{eliminada}$)$^{-1}$)

La carga de lodo purgado se calculó como la sumatoria de la carga de lodo de los cuatro (4) puntos de purga. Para ello se tuvo en cuenta la concentración de ST y el volumen purgado diariamente (caudal diario) de cada punto, esta operación matemática se ilustra con la Ecuación 4.3.

$$Carga\ lodo_{purgado} = \left(\sum Q_{wi} \times X_{Wi}\right) \times 0.0864$$ Ecuación 4.3

Donde,
Q_{wi}: Volumen diario de lodo purgado en cada punto (purga principal, purga secundaria, espuma y flotante)
X_{wi}: Concentración de ST en cada punto de purga ($mg.L^{-1}$)

La carga de DQO eliminada se estimó de acuerdo con la Ecuación 4.4.

$$Carga\ eliminada\ X = Q\left(C_a - C_e\right) \times 0.0864$$ Ecuación 4.4

Donde:

Carga eliminada (X):	Carga de DQO ($kg.d^{-1}$)
Q:	Caudal afluente ($L.s^{-1}$). No se consideran perdidas por evaporación por lo tanto el valor del caudal afluente y efluente es igual.
C_e:	Concentración de DQO afluente ($mg.L^{-1}$). En la Fase I se considera el ARd como el afluente, mientras que en la Fase II se considera el EP.
C_e:	Concentración de DQO efluente ($mg.L^{-1}$)

4.5 ESTRATEGIA DE ARRANQUE

4.5.1 Inoculación

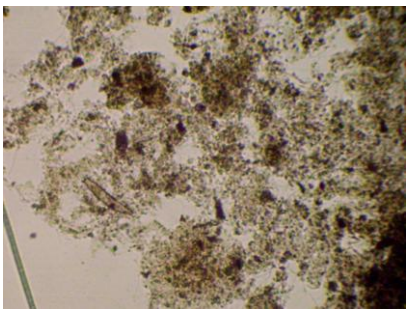
Se empleó como inóculo lodo proveniente del sistema de purga del sedimentador secundario de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica "Aguas del Sur", la cual recibe el agua residual del Barrio el Caney, ubicado al sur de Cali. Se utilizó este inóculo principalmente porque estaba aclimatado a un sustrato similar al que se emplearía en la planta piloto, aspecto que garantizó una rápida adaptación y asimilación al nuevo sustrato. La caracterización inicial de inóculo se presenta en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Caracterización del inoculo

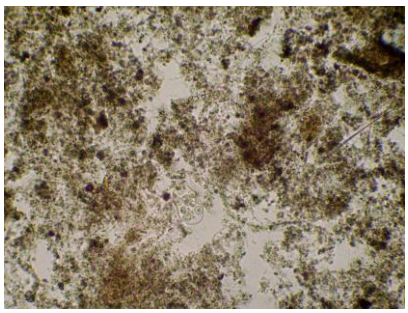
Variable	Unidad	Valor	Método*
ST	$mg.L^{-1}$	9.980	2540 D
SV	$mg.L^{-1}$	7880	2540 E
Relación SV/ST	-	0.79	-
pH	Unidades	6.5	4500 H^+
Temperatura	°C	26.5	2550 B

* APHA et al. (2005)

En la Figura 4.18 se ilustra la observación microscópica del inóculo, en ella se observan algunos consorcios microbianos formando el floc, donde se destacan *Aspidisca sp, Vorticella sp, Peranema, Epistylis* y rotíferos como indicadores de un lodo fresco y saludable.



(a) Presencia de organismos superiores



(b) Lodo denso y compacto con abundancia de organismos

Figura 4.18 Observación microscópica del inóculo

El volumen de lodo necesario para inocular los reactores (RC y RE), se calculó estableciendo una concentración ideal de SST en RC y RE de 1.200 $mg.L^{-1}$ y 3.000 $mg.L^{-1}$, respectivamente; estos valores fueron seleccionados tomando en consideración los resultados reportados Vásquez et al. (2011), en los cuales el SLAEC, para las condiciones operacionales referidas en la Tabla 4.2, operó adecuadamente con concentraciones de SST en RC entre 1.190 $mg.L^{-1}$ y 1.125 $mg.L^{-1}$, y en RE entre 3.205 $mg.L^{-1}$ y 3.173 $mg.L^{-1}$ respectivamente.

A partir de la condición anterior, el volumen de cada reactor (ver Tabla 4.1) y las características del inoculo (ver Tabla 4.7), se estimó que era necesario recolectar cerca de 2.0 m^3 de lodo, para inocular el sistema. El 80% del inóculo se ubicó en el RE y el 20% restante se dispuso en el RC, luego se completó el volumen útil de estas unidades con ARd.

4.5.2 Puesta en marcha

La puesta en marcha del sistema inició con la Fase I, es decir que el inóculo fue alimentado con ARd. Una vez que el volumen útil de cada unidad fue completado con ARd, se continuó con el suministro de OD. A través del manejo de válvulas se garantizó una concentración promedio de 3.0 $mg.L^{-1}$ en cada reactor. Durante 8 d, el sistema fue operado tipo batch, cada 24 h se realimentaron los reactores con ARd. Para el cambio de alimentación se suspendió la aireación por un periodo no mayor a 1 h, tiempo en el cual se observó la separación sólido – líquido, y con ayuda de mangueras plásticas se retiró el sobrenadante; finalizada esta actividad en la que se empleó entre 20 y 40 min, se suministró OD y se completó el volumen de cada reactor con ARd.

Finalizado el periodo anterior, el sistema se operó en forma semicontinua durante 8 d. Entre las 8:00 am y las 5:00 pm, el sistema fue alimentado de forma continua, el tiempo restante el sistema se operaba tipo batch con recirculación de lodo. Durante este periodo, la estrategia de incrementar paulatinamente la carga hidráulica permitió conocer bajo condiciones controladas la respuesta del sistema al nuevo sustrato e identificar las actividades de operación y mantenimiento a implementar, dada la nueva configuración de la planta piloto.

En esta etapa de arranque, el sistema fue alimentado durante 48 h con un caudal de ARd de 0.36 $L.s^{-1}$, el cual equivalía al 50% del caudal de operación señalado en la Tabla 4.2. También entró en el circuito de operación el SS, se empleó una recirculación del 72% (Q_R=0.26$L.s^{-1}$) con relación al caudal afluente. Durante este periodo, el licor mixto de RC y RE se tornó de un color café.

Al final de este periodo, la carga hidráulica se incrementó hasta un valor que representaba el 75% del caudal de operación señalado en la Tabla 4.2 (Q=0.54 $L.s^{-1}$), así mismo se disminuyó el caudal de recirculación hasta un porcentaje que representaba el 48% del caudal afluente (Q_R=0.26$L.s^{-1}$). Bajo esta condición, que tuvo una duración de 8 d, mejoraron las características de sedimentabilidad del lodo secundario y se evidenció la presencia de microorganismos superiores como protozoos y micrometazoarios que contribuyeron con la formación de un floc de mayor tamaño.

Finalizada la etapa anterior, el sistema operó continuamente durante 30 d, tiempo en el cual se incrementó la carga hidráulica hasta alcanzar las condiciones de operación, referidas en la Tabla 4.2. Durante este periodo la condición de estabilidad del desempeño del sistema se determinó a través de eficiencias de reducción de DQO y SST superiores al 80%.

Finalmente, se dio inicio a la evaluación del sistema, para TRH de 0.84 h en el RC, un porcentaje de recirculación de lodo del 40%, con el cual se garantizó un TRH de 4.36 h en el RE y TRC de 6 d como los parámetros operacionales más importantes.

Se adoptó el by-pass, como estrategia operacional para garantizar el funcionamiento de la planta. Dicha estrategia se aplicó cuando se advirtió la presencia de detergentes, grasas y lodo séptico en el desarenador.

Para la transición de una Fase a otra se consideró un periodo de 5 días para permitir la adaptación y asimilación de los microorganismo al nuevo régimen de alimentación. Se inició con un caudal bajo: 25% del caudal de operación durante 1 d y luego se incrementó hasta el 50% por dos días más, posteriormente 75% del caudal por un día y finalmente, se operó el sistema con 100% del caudal de operación durante 2 días.

4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

De acuerdo con los objetivos planteados y la magnitud del montaje experimental, esta investigación se definió como un "Estudio Comparativo de dos Poblaciones". A través del análisis del comportamiento de las variables fisicoquímicas, de control y operación se compararon las poblaciones para contrastar las hipótesis de investigación.

Se definió la clarificación primaria del AR como el factor causal que determinó los efectos que fueron observados sobre las variables de control y desempeño del sistema. Las dos poblaciones a contrastar fueron el desempeño del sistema en la Fase I (Población 1) y Fase II (Población 2).

4.6.1 Análisis del comportamiento de las variables fisicoquímicas, de control y desempeño del sistema en cada Fase

El comportamiento de las variables de control y desempeño del sistema se analizó empleando herramientas de la estadística descriptiva; las siguientes definiciones estadísticas fueron utilizadas para tal fin:

Media aritmética ó Promedio (Prom.): valor de la variable obtenido al hallar el cociente de la suma de los valores de la variable de cada uno de los elementos de la población, entre el número de observaciones.

Mediana (Med): valor de la variable tal que, una vez ordenados estos valores en orden creciente, ocupa el valor central; es decir que el número de datos que preceden a la mediana es igual al que le siguen.

Máximo (Max): valor más alto que se registró en la variable

Mínimo (Min): valor más bajo que se registró en la variable

Desviación Estándar (Desv.): parámetro que mide la dispersión de los valores de la variable, se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

La representación gráfica de cada una de las variables operacionales y de control se realizó a través de box-plot (cajas y alambres), el cual resume el comportamiento estadístico de cada serie de datos utilizando el concepto de percentiles (Pértega y Pita, 2001). En la Figura 4.19 se ilustra la representación gráfica del box-plot. La caja central indica el rango en el que se concentra el 50% de los datos, sus extremos son el 1 ^{er} y 3 ^{er} cuartil de la distribución. La línea central en la caja es la mediana, si la variable es simétrica, dicha línea se encuentra en el centro de la caja. Los extremos de los "bigotes" que salen de la caja son los valores que delimitan el 95% de los datos, en ocasiones coinciden con los valores extremos de la distribución. Se suelen también representar aquellas observaciones que caen fuera de este rango (outliers o valores extremos), lo cual es útil para comprobar gráficamente, posibles errores en los datos (Pértega y Pita, 2001).

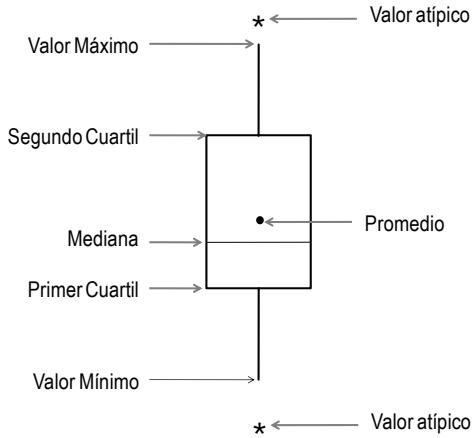


Figura 4.19 Representación del box-plot

4.6.2 Comparación de las Fases

Para este tipo de estudios, Méndez (1991) siguiere aplicar la prueba de t-Student como método estadístico para comparar dos poblaciones. Como variable de respuesta, para medir el desempeño del sistema se seleccionaron las variables operacionales y fisicoquímicas.

- **Análisis comparativo de la calidad del AR**

Para eliminar el ruido generado que introduce el hecho de comparar dos poblaciones que se ubicaron en dos periodos diferentes y en un sistema en el cual la composición del AR afluente cambia constantemente, se realizó un análisis estadístico de la composición fisicoquímica del AR afluente (ARd Fase I, ARd Fase II y EP), empleando como estadístico de prueba ANOVA de un solo factor, la cual compara las medias de tres o más muestras para determinar si difieren significativamente; para esta prueba el software define que no es necesario que los datos estén distribuidos normalmente si las muestras tienen un tamaño de por lo menos 15 ó 20. Se empleó un método gráfico de comparación de medias para establecer cuál variable presentó diferencias significativas, se admitieron diferencias con un nivel de significancia de 0.05.

La prueba de Anova de un solo factor se aplicó empleando el menú "asistente para prueba de hipótesis" del software Minitab 16® versión de prueba, el cual incluye la comprobación previa del cumplimiento del supuesto de normalidad y no requiere que las muestras tengan varianzas iguales.

- **Hipótesis estadística**

Hipótesis nula (Ho.): *"El promedio de cada una de las variables que determinaron la composición del AR afluente es igual en la Fase I y Fase II".*

Hipótesis alternativa (Ha*): "El promedio de al menos una de las variables que determinaron la composición del ARd es diferente para las dos fases evaluadas".*

Las variables a través de las cuales se analizó la composición del ARd fueron: pH, alcalinidad total, DQO, DBO_5 y SST.

En los casos donde el tamaño de la muestra fue inferior a 15 se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para verificar el supuesto de normalidad. Las hipótesis consideradas para tal fin fueron:

Ho: Los datos describen una distribución normal
Ha: Los datos no describen una distribución normal

El nivel de significancia para esta prueba fue $p< 0.05$, con valores mayores a este no se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto los datos siguen una distribución normal y se toman como válidos los resultados de la ANOVA.

- **Análisis comparativo del efecto de la ausencia de la clarificación primaria sobre el comportamiento de las variables operacionales y fisicoquímicas**

La influencia de la clarificación primaria sobre el desempeño del sistema se evaluó a través del comportamiento de las variables operacionales y fisicoquímicas. Se empleó la prueba-t Student como estadístico de prueba, la cual compara el promedio de cada variable y admite diferencias con un nivel de significancia de 0.05.

- **Hipótesis estadística**

Hipótesis nula (Ho.): *"El promedio de la variable en la Fase I es igual al promedio de la variable en la Fase II"*

Hipótesis alternativa (Ha*): "El promedio de la variable en la Fase I es diferente al promedio de la variable en la Fase II"*

Como variables operacionales se emplearon: Factor α, TRC, OD, Temperatura (licor mixto), SSVLM, Relación A/M y COV. Mientras que para las variables fisicoquímicas se emplearon: pH (ES y licor mixto), alcalinidad total, DQO, DBO_5 y SST.

4.6.3 Análisis del efecto que tiene la ausencia de la clarificación primaria sobre las características de sedimentabilidad del lodo secundario y producción de sólidos

Para determinar el efecto que tuvo la ausencia de la clarificación primaria sobre las características de sedimentabilidad del lodo secundario, se comparó estadísticamente el comportamiento que presentaron los índices empleados para tal fin, como son VSZ, IVL e IVLD. La interpretación de estos resultados también se apoyó en la estadística descriptiva. Se empleó la prueba t-Student como método estadístico. Se aceptaron como diferencias significativas aquellas que presentaron un nivel de significancia menor a 0.05.

- ***Hipótesis para contrastar las características de sedimentabilidad del lodo secundario***

Hipótesis nula (Ho.): *"El promedio del índice "X" de la Fase I es igual al promedio del índice "X" en la Fase II"*

Hipótesis alternativa (Ha*): "El promedio del índice "X" en la Fase I es diferente al promedio del índice "X" en la Fase II"*

Se entiende como índice "X": las pruebas que determinaron la sedimentabilidad del lodo secundario: VSZ, IVL e IVLD.

- ***Hipótesis para contrastar la producción de lodos***

Para determinar estadísticamente las diferencias en la producción de lodo entre las dos poblaciones, se contrastó la siguiente hipótesis.

Hipótesis nula (Ho.): "La producción de lodos (Px) promedio fue igual en las dos fases"
Hipótesis alternativa (Ha): "La producción de lodos (Px) promedio fue diferente entre una fase y otra"

Para el desarrollo de la prueba t-Student se empleó el menú "asistente para prueba de hipótesis" del software Minitab 16® versión de prueba, el cual incluye la comprobación previa del cumplimiento del supuesto de normalidad y no requiere que las muestras tengan varianzas iguales.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

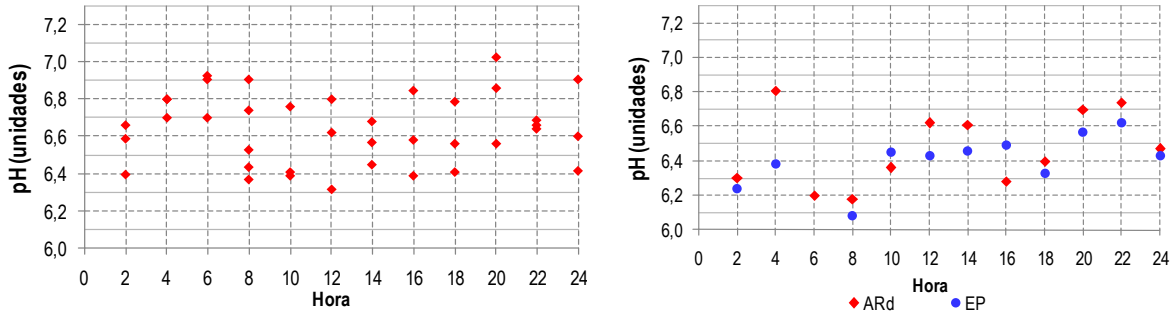
Se presentan los principales resultados de las variables analizadas para medir el desempeño del sistema en cada una de las fases de evaluación. La información obtenida de cada variable se presenta a través de Box-plot y curvas de variación. El comportamiento estadístico de cada variable se resume en Tablas, en las que se incluye el Promedio, Mediana, Máximo, Mínimo, Desviación Estándar y número de datos; en el Anexo 8.1 se detallan los datos recolectados en cada Fase y en el Anexo 8.2 se presentan los resultados de la comparación estadística del comportamiento de las variables operacionales y fisicoquímicas.

5.1 COMPOSICIÓN DEL ARd Y EP

A través del análisis de la composición del ARd y EP se establecieron las variaciones de los principales constituyentes fisicoquímicos en el AR, dicho análisis se realizó a partir de jornadas de muestreo de 24 h que permitieron determinar el comportamiento horario de la composición del ARd y EP. Así mismo, se tomaron muestras puntuales de los afluentes mencionados durante el periodo de evaluación a partir de las cuales se identificó el tipo de AR que ingresó al sistema, la frecuencia de muestreo se detalló previamente en la Tabla 4.4.

5.1.1 Muestreo horario

Los muestreos horarios indicaron que a lo largo del día la variación del pH en el ARd describió un comportamiento de aumento y descenso; los valores más altos de pH se encontraron entre las 6 y 8 h, mientras que los valores más bajos se ubicaron al medio día (12 h), tal como se ilustra en la Figura 5.1a. En el ARd el 62% del tiempo el pH varió en un rango entre 6.6 y 6.9 unidades; el valor mínimo y máximo fue 6.2 y 7.3 unidades respectivamente, sugiriendo que la fluctuación del pH en el ARd durante periodos de 24h es inferior a una unidad. En el EP no se observó una tendencia marcada relacionada con cambios horarios, tal como se ilustra en la Figura 5.1b. El 50% del tiempo, es decir 12 h de un periodo de 24 h el pH del EP varió entre 6.4 y 6.5 unidades, estos valores se presentaron con mayor frecuencia entre las 10 y 16 h.

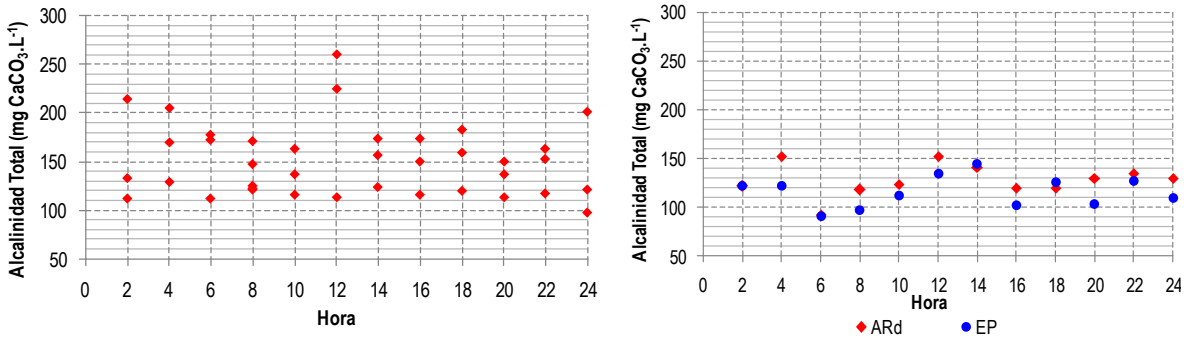


(a) ARd –Fase I (b) ARd y EP – Fase II

Figura 5.1 Variación horaria del pH

La variación horaria de pH en el ARd afluente a la planta piloto no evidenció el impacto que pueden tener las descargas de AR del sector industrial y comercial de la Ciudad, tal comportamiento pudo ser provocado por el efecto de dilución que ocurre con estos vertimientos cuando ingresan al sistema de alcantarillado, el cual recoge conjuntamente ARD y agua lluvia (ALL), sumado a ello el tiempo de reacción también minimizó el efecto de estas descargas, dado que el AR en los colectores demora entre 3 y 4 h antes de ser descargada en la cámara de integración de la PTAR-C.

La variación horaria de la alcalinidad total en el ARd presentó un comportamiento similar al descrito por el pH, con tendencia a valores bajos entre las 10 y 12 h, los picos de concentración entre las 14 y 18 h (Figura 5.2a). Durante las jornadas de muestreo horario, el 86% del tiempo la alcalinidad total en el ARd fluctuó en un rango entre 120 y 180 $mg.L^{-1}$, este rango se encontró con mayor frecuencia entre las 14 y 20h. En la Figura 5.2b se ilustra la variación horaria de la alcalinidad total en el EP, la cual describió una curva de aumento y descenso a medida que transcurrió el día, los valores más bajos se presentaron en horas de la mañana y noche; a partir de las 8 h la concentración se incrementó hora a hora y alcanzó su máximo valor entre las 12 y 14 h; sin embargo la variación de la alcalinidad total en el EP fue menor en comparación con la observada en el ARd; en el EP predominaron valores entre 100 y 140 $mg.L^{-1}$.



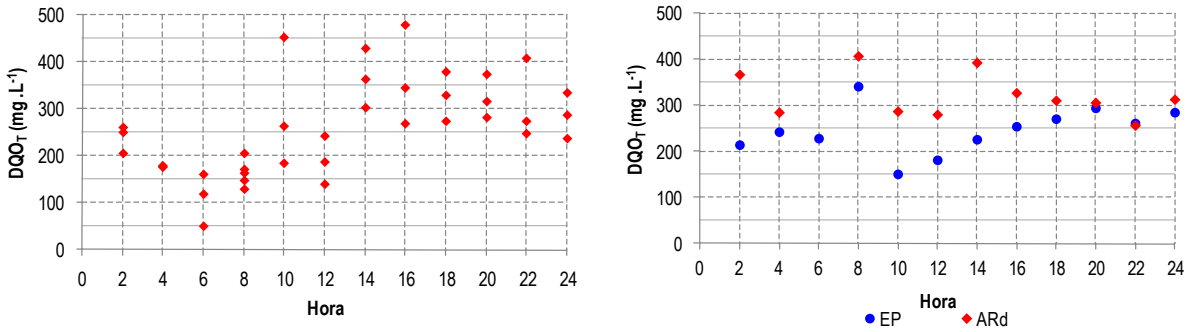
(a) ARd –Fase I (b) ARd y EP – Fase II

Figura 5.2 Variación horaria de la Alcalinidad Total

Los muestreos de variación horaria presentados en la Figura 5.3a mostraron que la concentración DQO en el ARd presentó dos tendencias marcadas, entre las 0 y 8h predominó ARd con valores de DQO inferiores a 200 $mg.L^{-1}$, entre las 8 y 14 h la concentración de DQO se incrementó hora a hora registrando picos hasta de 450 $mg.L^{-1}$, este comportamiento de ascenso prevaleció el 80% del tiempo durante los muestreos. Entre las 14 y 24 h la concentración descendió hasta valores cercanos a 250 $mg.L^{-1}$. En el EP las fluctuaciones horarias no fueron tan significativas en comparación con las observadas en el ARd, y predominó un rango entre 50 y 90 $mg.L^{-1}$, tal como se ilustra en la Figura 5.3b.

A diferencia de las variables anteriores (pH y alcalinidad total) la variación horaria de la DQO del ARd describió una curva similar a la reportada por Metcalf y Eddy (2003) para el ARD, en la cual las menores concentraciones se ubican entre las 0 y 6 h, producto de la disminución de la actividad residencial y comercial en la Ciudad, mientras que los picos de concentración generados por una

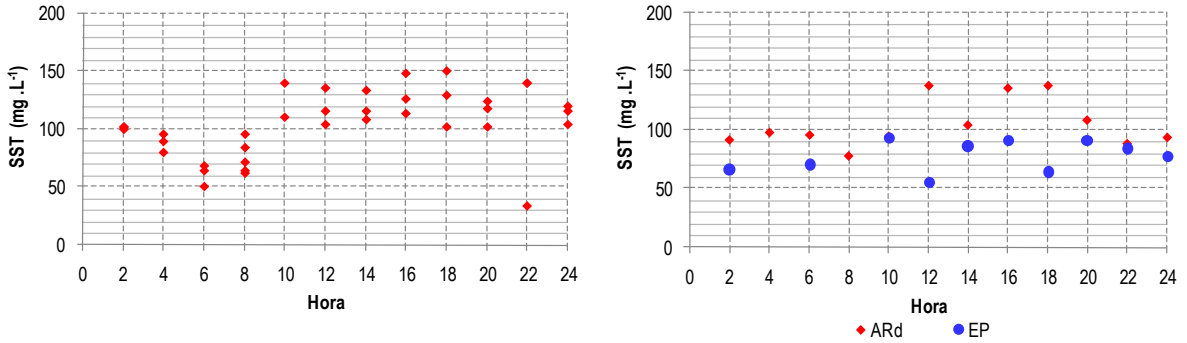
fuerte actividad residencial y comercial se encuentran a las 12 y 20 h, tal como se observa en la Figura 5.3a el pico de concentración de DQO en el ARd se ubicó entre las 14 y 16 h.



(a) ARd –Fase I (b) ARd y EP – Fase II

Figura 5.3 Variación horaria de la DQO $_T$

La variación horaria de los SST en el ARd presentó un comportamiento similar al descrito por la DQO; las concentraciones más bajas de SST se presentaron en las primeras horas de la mañana con el valor más bajo alrededor de las 6 h, mientras el pico de concentración se ubicó entre las 14 h y 18 h (ver Figura 5.4a). El 78% del tiempo prevalecieron concentraciones entre 90 y 130 mg.L^{-1} que ocurrieron con mayor frecuencia entre las10 y 16 h. En el EP predominaron concentraciones entre 50 y 100 mg.L^{-1} (ver Figura 5.4b), un rango muy bajo que no permitió establecer variaciones horarias con tendencias bien definidas.



(a) ARd –Fase I (b) ARd y EP – Fase II

Figura 5.4 Variación horaria de los SST

En general, los muestreos horarios indicaron una marcada tendencia en la variación horaria en la calidad del ARd; la calidad típica en este afluente se encontró entre las 10 y 14 h, ello como resultado de incremento del la actividad residencial, comercial e industrial en la Ciudad. Las fluctuaciones en la composición del ARd fueron amortiguadas con la clarificación primaria durante la Fase II.

El comportamiento anterior indicó que muestras puntuales entre las 10 y 14h eran representativas de la calidad del ARd predominante durante la Fase I, mientras que para la Fase II la calidad del EP no dependía de las fluctuaciones horarias dado que la clarificación primaria desempeñó una función de

homogenización de la calidad del AR afluente, por tal motivo las muestras puntuales para controlar y medir el desempeño del sistema se recolectaron entre las 10 y 11 am.

5.1.2 Muestreo puntual

La calidad del AR es un factor fundamental en el desempeño de los sistemas biológicos, la Temperatura, pH y Alcalinidad Total entre otros, definen las características del medio en el cual se desarrollan las reacciones de síntesis o asimilación de la materia orgánica (MO). Analizar las características fisicoquímicas del ARd y Efluente Primario (EP) a partir de muestras puntuales con las frecuencias previamente indicadas en la Tabla 4.3 permitió identificar el tipo de AR que ingresó al sistema biológico y medir su efecto sobre el desempeño de los sistemas evaluados. En la Tabla 5.1 se resume el comportamiento estadístico de las principales variables fisicoquímicas del ARd y EP.

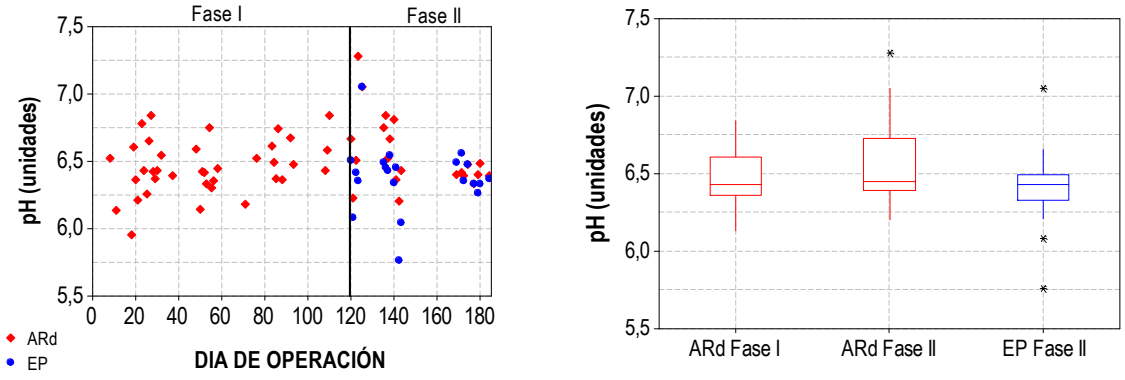
Tabla 5.1 Resumen estadístico de las características del ARd y EP

Variable Fisicoquímica	FASE I						FASE II											
	ARd						ARd						EP					
	Prom.	Med.	Max.	Min.	Desv.	n	Prom.	Med.	Max.	Min.	Desv.	n	Prom.	Med.	Max.	Min.	Desv.	n
pH (unidades)	-	6,43	6,84	6,13	0,19	37	-	6,45	7,05	6,20	0,28	20	-	6,43	6,66	6,21	0,24	21
Alcalinidad total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	169	166	232	120	29	33	124	124	152	93	17	13	113	116	135	87	17	13
DQO T ($mg.L^{-1}$)	243	230	430	70	91	59	242	217	407	82	81	34	181	163	322	73	70	34
DBO_5 T ($mg.L^{-1}$)	197	185	300	110	78	18	151	135	230	105	44	12	112	95	210	58	43	13
SST	98	98	150	40	28	55	102	98	158	16	46	33	80	82	118	48	19	32

Prom.: media aritmética; **Med.:** mediana; **Max**.: máximo; **Min.:** mínimo; **Desv**.: desviación estándar; **n**: número de datos

a) pH

El pH del ARd presentó un rango predominante entre 6.3 y 6.7 unidades, con muy pocos valores atípicos, tal como se ilustra en la Figura 5.5b; este rango de variación se encuentra dentro de los límites que autores como Lester y Birkett (1999) y Mendonça (1999) recomiendan adecuado para el crecimiento microbiano: 7±1 unidades. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede inferir que el pH del ARd no tuvo efectos desfavorables ó adversos sobre la actividad microbiana en el sistema biológico (RC), por el contrario fomentó un ambiente adecuado para las reacciones de síntesis y asimilación de la MO.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.5 pH del ARd y EP

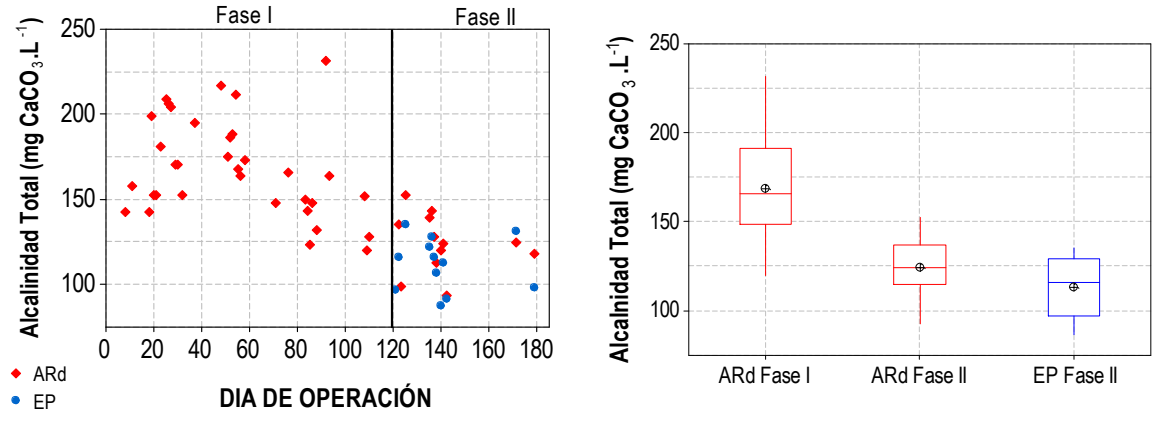
La clarificación primaria del ARd durante la Fase II, disminuyó la intensidad del pH en el AR; mientras que en el ARd el pH fluctuó en un rango entre 6.4 y 6.7 unidades, en el EP este rango se ubicó entre 6.3 y 6.4 unidades, indicando que la decantación de partículas disminuyó la amplitud del rango de variación, sin embargo en ambos casos el pH se ubicó en un rango cercano a la neutralidad.

En investigaciones anteriores, el pH del AR afluente a la PTAR-C se ubicó en un rango entre 6.1 y 7.7 unidades (Vásquez et al., 2011); al comparar estos rangos con los observados en esta investigación, se infiere que la calidad del AR afluente a la PTAR-C, en torno a esta variable no ha cambiado significativamente, aunque actualmente presenta una tendencia a ubicarse por debajo de valor neutro de pH, comportamiento posiblemente causado por el ingreso de otros colectores al sistema de alcantarillado que conduce el ARD hasta la PTAR-C.

Estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre el pH del ARd Fase I y ARd Fase II en el nivel de significancia de 0.05, este resultado sugirió que la composición del ARd en torno a esta variable no fue alterada aún cuando los eventos de lluvias durante la Fase II fueron más acentuados. De otro lado, tampoco se encontraron diferencias significativas entre el pH del ARd Fase I y EP Fase II, estos afluentes alimentaron el sistema biológico en cada fase por lo que el efecto derivado de esta variable no marco diferencia en el desempeño del sistema.

b) Alcalinidad Total

Respecto al comportamiento de la Alcalinidad Total ilustrado en la Figura 5.6, se observó un rango predominante en el ARd Fase I entre 115 y 190 mg $CaCO_3.L^{-1}$ y en Fase II entre 115 y 137 mg $CaCO_3.L^{-1}$; de acuerdo con Metcalf y Eddy (2003) estos rangos son típicos de ARD denominada entre fuerte y media concentración. El promedio de la Alcalinidad Total en el ARd en este estudio fue 154 mg $CaCO_3.L^{-1}$, valor cercano al promedio de 181 mg $CaCO_3.L^{-1}$ reportado por Vásquez et al. (2011), aspecto que indicó una tendencia a disminuir su valor.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.6 Alcalinidad Total del ARd y EP

Se observó diferencia entre el contenido de Alcalinidad Total del ARd de la Fase I y el ARd de la Fase II, la cual pudo ser provocada por los eventos de lluvias que se acentuaron durante evaluación

de la Fase II, lo que promovió un efecto de dilución sobre el ARd; esta dilución no se observó con los valores de pH del ARd, ratificando que es más fácil detectar cambios en la composición del AR monitoreando la alcalinidad en lugar de usar el pH, según afirman Davis y Harshman (1991) un cambio en 0.3 unidades de pH pueden ser equivalentes a 200 mg $CaCO_3.L^{-1}$.

En la Fase II, se observó una disminución del contenido de Alcalinidad Total después de la clarificación primaria; en el ARd Fase II el rango predominante se encontró entre 115 y 137 mg $CaCO_3.L^{-1}$ y en el EP este rango se ubicó entre 97 y 129 mg $CaCO_3.L^{-1}$ (ver Figura 5.6 b), lo que significó un consumo promedio del 12%. Un comportamiento similar fue asociado por Vásquez (2009) con procesos de hidrólisis del lodo primario, relacionados con fenómenos incipientes de descomposición anaerobia; algunas condiciones operacionales tales como la permanencia del lodo sedimentado en el clarificador primario, principalmente durante el horario nocturno, podrían haber fomentado la ocurrencia de este tipo de procesos, explicando el consumo de alcalinidad expresado a través de la disminución de su contenido en el efluente primario.

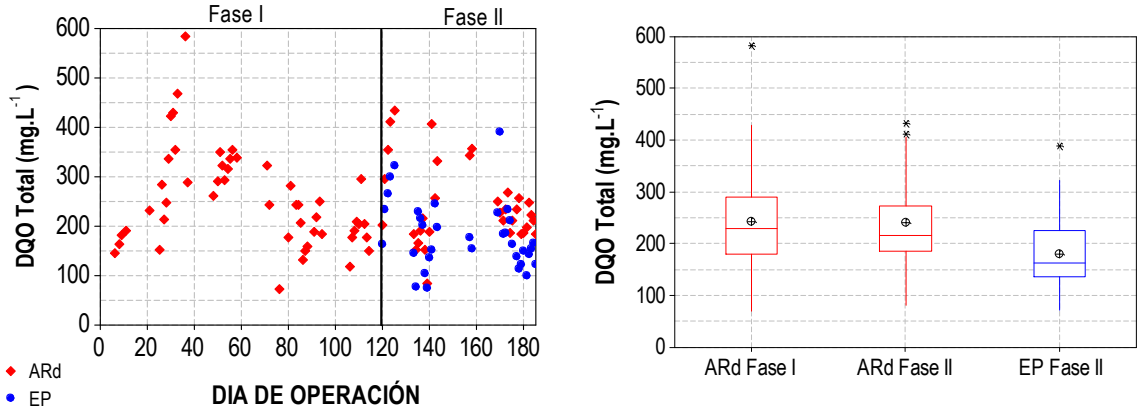
Estadísticamente se comprobó que existieron diferencias significativas entre los promedio de alcalinidad total del ARd Fase I, ARd Fase II y EP en el nivel de significancia de 0.05. Esta diferencia podría no tener efectos significativos en el desempeño del sistema biológico, dados los valores significativamente altos de alcalinidad presente en el ARd y EP; aún cuando la clarificación primaria disminuyó su contenido tanto el ARd como el EP son comparables por su contenido con ARD denominada entre media y fuerte concentración, según la clasificación propuesta por Metcalf y Eddy (2003).

De otro lado, el contenido de alcalinidad en sistemas aerobios es importante para evitar procesos de acidificación durante la degradación de la materia orgánica, como resultado de la liberación de CO_2, para lo cual van Haandel y van der Lubbe (2007) recomiendan que la relación Alcalinidad/DQO este alrededor de 0.5; en el caso del ARd Fase I y EP Fase II esta relación presentó valores promedio de 0.67 y 0.57 respectivamente, por lo que se infiere que el contenido de alcalinidad total en el ARd y EP fue suficiente para neutralizar las sustancias acidas que se liberaron durante la transformación biológica de la MO. Bajo la configuración del SLAEC la transformación de la MO tiene lugar principalmente en el RE y el licor mixto estabilizado fluye continuamente hacia el RC, en el caso de no tener alcalinidad suficiente en el medio acuoso para satisfacer la demanda ejercida por la reducción de MO, para la cual Ramalho et al. (1996) sugiere que la reducción 1.0 kg de DBO_5 genera un consumo de 0.5 kg de alcalinidad (como $CaCO_3$), los efectos de ese evento podrían notarse en el desempeño del RC.

c) DQO, DBO_5 y SST

El ARD afluente a la PTAR-C se ha caracterizado por tener bajas concentraciones de DQO, DBO_5 y SST, así lo señalan las investigaciones realizadas en años anteriores, donde se reportan valores promedio de DQO: 286 $mg.L^{-1}$, DBO_5: 164 $mg.L^{-1}$ y SST: 81 $mg.L^{-1}$ (EMCALI-UNIVALLE, 2007), DQO: 250 $mg.L^{-1}$, DBO_5: 126 $mg.L^{-1}$ y SST: 125 $mg.L^{-1}$ (EMCALI-UNIVALLE, 2008) y DQO: 411 $mg.L^{-1}$, DBO_5: 275 $mg.L^{-1}$ y SST: 162 $mg.L^{-1}$ (Vásquez et al., 2011). De acuerdo con estas características y con la clasificación que propone Metcalf y Eddy (2003) el ARD afluente a la PTAR-C ha sido clasificada entre débil y media concentración.

Durante la fase experimental, la DQO en el ARd afluente a la plata piloto se ubicó en un rango de variación predominante entre 180 y 290 $mg.L^{-1}$, con una mediana de 230 $mg.L^{-1}$ y 217 $mg.L^{-1}$ para la Fase I y Fase II respectivamente, tal como se ilustra en la Figura 5.7. El rango observado incluye el valor promedio reportado en el año 2007 y 2008, lo que indicó que en el ARd prevalecieron características de AR entre débil y media concentración, típica en años anteriores. Concentraciones de DQO entre 294 y 433 $mg.L^{-1}$ ocurrieron con menor frecuencia en el ARd, sin embargo estos valores fueron similares al promedio reportado por Vásquez et al. (2011).



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.7 DQO Total del ARd y EP

La inclusión de la clarificación primaria promovió cambios en el afluente al sistema biológico; en torno a la DQO las concentraciones en el EP variaron en un rango predominante entre 136 y 226 $mg.L^{-1}$ con una mediana de 163 $mg.L^{-1}$; la disminución de la DQO promovida por la decantación de partículas significó una reducción promedio del 30%, esta eficiencia se encuentra dentro de los niveles esperados según lo reportado por autores como Metcalf y Eddy (2003), Jordão y Pessôa (2005) y von Sperling (2007).

El rango en el cual varió la DQO en el ARd (Fase I y Fase II) le otorgó características de ARD catalogada entre media y débil concentración, mientras que la DQO del EP (Fase II) varió en un rango denominado de débil concentración, de acuerdo con la clasificación propuesta por Metcalf y Eddy (2003).

Estadísticamente no existieron diferencias significativas entre la DQO promedio del ARd de la Fase I y ARd Fase II, lo que indicó que la variación climática no afectó la composición del ARd en torno a esta variable, ello permitió disminuir el ruido que se introdujo en la investigación al comparar dos sistemas que se desarrollaron en diferentes periodos. Por otro lado, estadísticamente el promedio de la DQO del ARd de la Fase I y ARd Fase II difirió significativamente del promedio de la DQO del EP, este resultado es completamente atribuible al efecto de la clarificación primaria sobre la composición del ARd, sin embargo lo más interesante es que el tipo de sustrato que ingresó al sistema biológico en la Fase I probablemente fue diferente al que ingresó al sistema biológico en la Fase II, lo cual pudo promover diferencias en el desempeño del sistema.

Un acercamiento a la distribución de partículas en el ARd determinada a través de la fracción filtrable (DQO_F), la cual se puede correlacionar con la MO disuelta, señaló que esta se encontraba en mayor proporción en comparación con la MO particulada tal como se ilustra en la Figura 5.8; este aspecto fue favorable para el mecanismo de biosorción que se desarrolló en el RC, pero para efectos de la eficiencia de la clarificación primaria en la Fase II podría haber sido desfavorable, ya que hay un menor número de partículas susceptibles de ser decantadas. Tebbutt (1979) anota que la materia particulada en el AR es de naturaleza floculenta y cuando se encuentra en mayor proporción causa la formación de sólidos rápidamente sedimentables. En el ARd la MO particulada se encontró en muy baja proporción por lo que se infiere que esta característica condicionó el desempeño del clarificador primario en la Fase II.

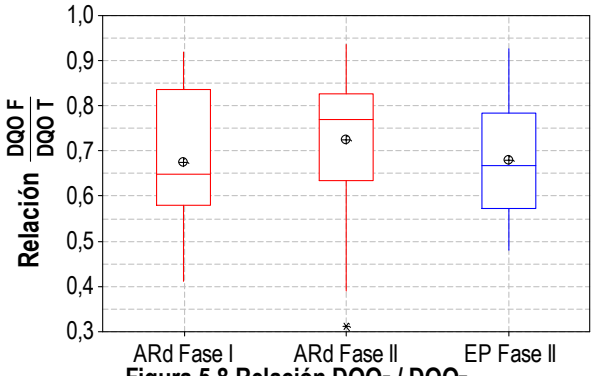
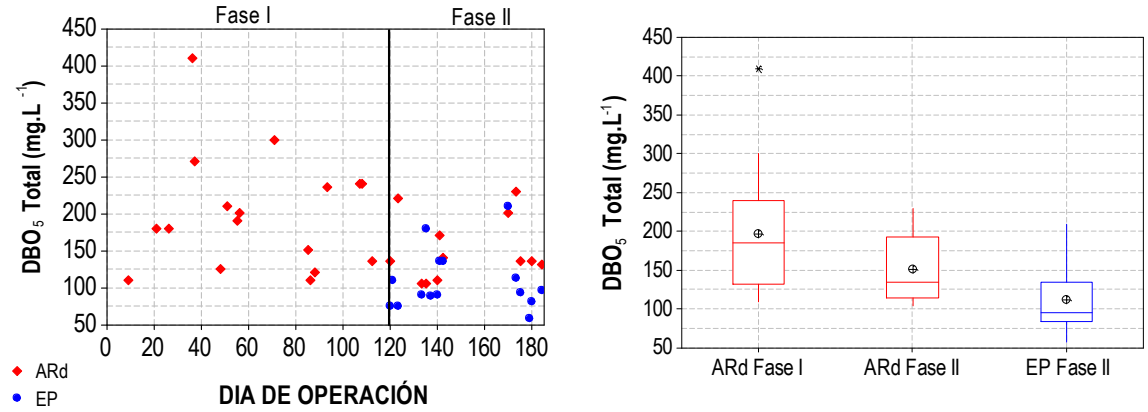


Figura 5.8 Relación DQO_F / DQO_T

La DBO_5 en el ARd varió en un rango predominante entre 115 y 240 $mg.L^{-1}$ (ver Figura 5.9), con una mediana de 185 $mg.L^{-1}$ en la Fase I y 135 $mg.L^{-1}$ en la Fase II, el valor promedio de cada Fase es similar al reportado en años anteriores por EMCALI-UNIVALLE (2007) y EMCALI-UNIVALLE (2008). Las diferencias observadas en la distribución de DBO_5 en el ARd de la Fase I y Fase II pudieron ser promovidas por los eventos de lluvia que fomentaron la dilución del AR durante la Fase II, sin embargo para la clasificación que propone Metcalf y Eddy (2003) estos afluentes son catalogados como ARD entre media y débil concentración.



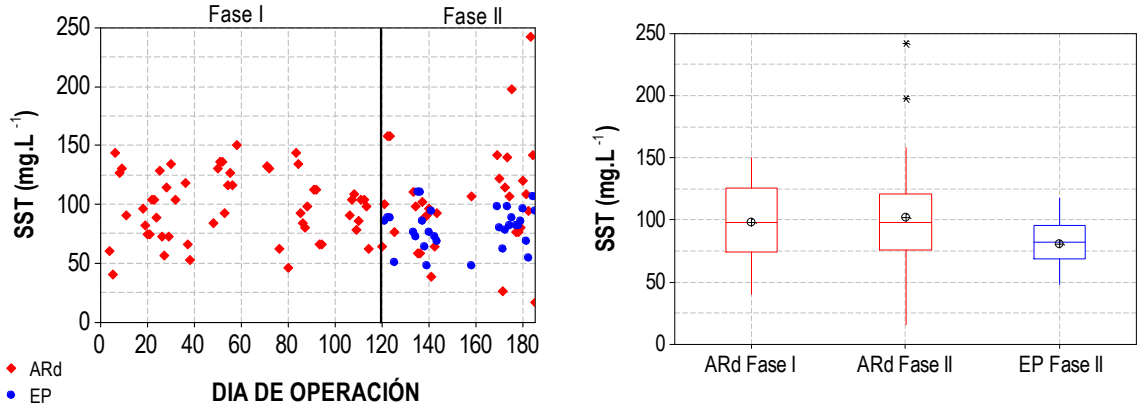
(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.9 DBO_5 Total del ARd y EP

En el EP la DBO_5 predominó en un rango entre 84 y 135 $mg.L^{-1}$ con una mediana de 95 $mg.L^{-1}$, estos valores son típicos en ARD de débil concentración, de acuerdo con la clasificación propuesta por Metcalf y Eddy (2003). Al igual que lo observado con la DQO, la inclusión de la clarificación primaria redujo el contenido de DBO_5 afluente al sistema biológico, tal reducción estuvo asociada con una eficiencia promedio del clarificador primario del 32%, la cual es semejante a los niveles reportados por autores como Metcalf y Eddy (2003), Jordão y Pessôa (2005) y von Sperling (2007).

Estadísticamente no existieron diferencias significativas entre la DBO_5 promedio del ARd Fase I y ARd Fase II, lo cual sugirió que la composición del ARd no varió de una Fase a otra; la interpretación de este resultado es similar a la expresada anteriormente a través de la DQO, ya que estas variables son indicadoras del contenido de MO en el AR y los cambios en su concentración cuando no son debidos a procesos biológicos describen un comportamiento similar. Estadísticamente se estableció que existieron diferencias significativas entre la DBO_5 promedio del ARd (Fase I y Fase II) y la DBO_5 promedio del EP en un nivel de significancia de 0.05, nuevamente este comportamiento es atribuido al efecto que tiene la decantación o arrastre de partículas efectuado por la clarificación primaria. La disminución del sustrato biodegradable en la Fase II en comparación con la Fase I podría fomentar en el primer caso un ambiente de escases de nutrientes en el RC ó en el segundo caso un ambiente de exceso de nutrientes, los dos escenarios resultan desfavorables para el adecuado desempeño del sistema, sin embargo este efecto es medible a través de la relación A/M la cual se analiza más adelante.

En el ARd predominaron concentraciones de SST entre 74 y 126 $mg.L^{-1}$, con un valor promedio de 98 $mg.L^{-1}$ en la Fase I y 101 $mg.L^{-1}$ en la Fase II, tal como se ilustra en la Figura 5.10. Se observó gran similitud con los SST reportados por EMCALI-UNIVALLE (2007) y EMCALI-UNIVALLE (2008) para el ARD afluente a la PTAR-C. Contrario a lo observado con la DBO_5, los SST en el ARd se conservaron dentro de un rango de variación similar entre las dos Fases, es decir que los eventos de lluvia no generaron dilución de la concentración de SST.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.10 SST del ARd y EP

La clarificación primaria del ARd (Fase II) disminuyó el contenido de SST, alcanzando valores en el EP entre 69 y 96 $mg.L^{-1}$ con un promedio de 80 $mg.L^{-1}$. En términos de la eficiencia, en promedio la

clarificación primaria redujo el 33% de los SST, este porcentaje es inferior a los limites reportados por los autores como Metcalf y Eddy (2003), Jordão y Pessôa (2005) y von Sperling (2007), tal resultado pudo estar influenciado por las características del ARd, indicando que una baja proporción de los sólidos suspendidos (SST) fueron susceptibles de ser removidos en la clarificación primaria, ratificando lo expuesto por Tebbutt (1979) quien afirma que a bajas concentración de SST la remoción de partículas por sedimentación simple disminuye.

Estadísticamente se encontraron diferencias significativas entre el promedio de los SST en el ARd Fase I y ARd Fase II, pero sí se encontraron diferencias entre estos y el promedio de SST en el EP en un nivel de significancia de 0.05, este resultado permite inferir que la clarificación primaria promovió cambios en la concentración de los SST, lo cual es acorde con lo esperado ya que este es el objetivo principal de este proceso.

Con la ausencia de clarificación primaria, al sistema biológico (RC) en la Fase I ingresó en promedio un 33% más de material particulado de naturaleza orgánica e inorgánica comparado con la Fase II, de acuerdo con Bolzonella et al. (2005) este material orgánico de naturaleza sedimentable puede ser convertido en sólidos solubles por el mecanismo de hidrólisis y posteriormente ser aprovechado por los microorganismos, sin embargo dicho mecanismo es 40% más lento que el comúnmente asociado con la hidrólisis del sustrato lentamente biodegradable en el ARD según lo afirma Okutman et al. (2001), lo que podría significar una menor tasa de crecimiento de los microorganismo en el sistema de la Fase II, reflejada a través de una menor concentración de SSVLM en el RE dado que es allí donde por la configuración del sistema, tiene lugar el mecanismo señalado.

d) Nutrientes, Detergentes y Grasas y Aceites

El desarrollo de la investigación evidenció la necesidad de inclusión de otras variables fisicoquímicas como Grasas y Aceites (G/A), detergentes y nutrientes que permitieran caracterizar de forma integral la calidad del ARd; los valores obtenidos se reportan en la Tabla 5.2. El contenido de Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) y Fósforo fue similar al reportado por Liu et al. (2009) para ARD, cuyos valores están en un rango entre 15 y 35 mg NH_3-N.L^{-1} y 1.0 y 2.5 mg PO_4^3-P.L^{-1}.

Tabla 5.2 Resumen estadístico otras características del ARd y EP

Variable Fisicoquímica	FASE I				FASE II							
	ARd				ARd				EP			
	Prom.	Max.	Min.	n	Prom.	Max.	Min.	n	Prom.	Max.	Min.	n
Grasas y Acetites (mg.L^{-1})	394	441	291	5	290	-	-	2	ND	-	-	-
Detergentes (mg LAS.L^{-1})	2,24	-	-	1	1,79	-	-	1	ND	-	-	-
Nitrógeno Amoniacal Total (mg N-NH_3.L^{-1})	23	25	21	3	36	51	27	3	22	24	21	3
Ortofosfatos (mg P.L^{-1})	3,10	3,54	2,65	3	3,54	3,93	3,14	2	2,66	3,10	2,19	3

Prom.: media aritmética; **Max**.: máximo; **Min.:** mínimo; **n**: número de datos; **ND**: No Detectado

Las Grasas y Aceites (G/A) en el ARd Fase I presentaron un valor promedio de 394 mg.L^{-1}, de acuerdo con Metcalf y Eddy (2003) concentraciones mayores a 100 mg G/A.L^{-1} son característicos de ARD de fuerte concentración, por lo que se infiere que en esta etapa el afluente a la PTAR-C presentó descargas con este tipo de contaminación. El aspecto más importante relacionado con este evento es que las G/A durante esta fase se acumularon en el sistema biológico, principalmente por

la ausencia de la clarificación primaria, la cual en la Fase II cumplió una función de una trampa grasas y minimizó el contenido de estas en el EP. En la Fase I eventos de flotación de lodo en el sedimentador secundario (SS) fueron asociados con este suceso, así como la formación de espuma con aspecto grasoso en la superficie del reactor de estabilización (RE), tal como se ilustra en la Figura 5.11; un comportamiento similar al anterior fue descrito por Ullrich y Smith (1957) en la PTAR de Austin (Texas). Las G/A en su mayoría flotan en el AR, sin embargo Metcalf y Eddy (2003) sugiere que una fracción de los aceites derivados del petróleo y alquitrán (queroseno y lubricantes), presentes en el agua residual pueden ser transportados hacia el lodo por los Sólidos Sedimentables (SSed); este comportamiento podría sugerir que los SSed en la Fase I, que ingresaron directamente al RC fomentaron la acumulación de G/A en el SS. De acuerdo con el mismo autor, sí las G/A no se eliminan hasta el valor mínimo aceptable pueden crear películas y materias en flotación imperceptibles.



Figura 5.11 Evidencia de la acumulación de G/A en el sistema biológico en la Fase I

La acumulación de G/A en el SS producto de la ausencia del la clarificación primaria, probablemente alteró las características de sedimentabilidad del lodo secundario provocando su flotación y eventual esponjamiento; para controlar la perdida de biomasa y estabilidad del sistema, durante estos eventos se realizaron cambios en las actividades de operación, entre estas actividades se destaca la puesta en batch con recirculación de lodo, previamente eliminando del sistema el lodo flotante que contenía G/A en concentraciones entre 3.120 y 9.400 mg G/A.L^{-1} (valores que indicaron la acumulación de G/A en el sistema provocada por la ausencia de la clarificación primaria), después de estos eventos el sistema se arrancaba implementado la estrategia descrita en el ítem 4.5.2 iniciando con 75% de la carga hidráulica e incrementándola paulatinamente hasta el 100%, esta actividad demandaba entre 2 y 3 d. Las actividades implementadas para controlar la pérdida de biomasa en el sistema, no permiten medir numéricamente el efecto de las G/A a través de la eficiencia del sistema.

De otro lado, también se advirtió la presencia de detergentes en el ARd, al observar la formación de espuma blanca de aspecto jabonoso en el RC (ver Figura 5.12), los niveles de detergente fueron confirmados encontrando en la Fase I un valor de 2,24 mg LAS.L^{-1} y en La Fase II, un valor de 1,79 mg LAS.L^{-1}. Aunque la cantidad de información no es concluyente se puede inferir de manera

preliminar que la sedimentación de partículas disminuyó el 20% del contenido de detergentes en el AR.

La presencia de surfactantes en concentraciones inhibitorias puede afectar el desempeño de los sistemas biológicos. Autores como Gerardi (2002) afirman que las caracteristicas de sedimentabilidad del lodo son alteradas por este tipo de sustancias promoviendo el crecimiento de biomasa dispersa y floc débil, así mismo Petrovic y Barceló (2004) afirman que incluso valores de 0.98 mg LAS.L^{-1} inhiben la tasa de respiración, la actividad enzimática y el crecimiento de la biomasa, por lo anterior y teniendo en cuenta que las concentraciones de detergentes en el ARd superaron este valor se puede inferir que este tipo de concentración pudo tener un impacto negativo sobre el desempeño del sistema biológico, especialmente en la Fase I dada la ausencia de la clarificación primaria, que en la Fase II disminuyó su concentración hasta valores no detectados.



Figura 5.12 Evidencia presencia de detergentes en el RC Fase I

A partir de todo lo anterior, se infiere que la calidad del ARd presentó una tendencia a ubicarse dentro de los valores bajos reportados en estudios anteriores por EMCALI-UNIVALLE (2007), EMCALI-UNIVALLE (2008) y Vásquez et al. (2011). Este comportamiento pudo ser causado por la inclusión de otros colectores al sistema de alcantarillado que conduce el ARD hacia la PTAR-C, creando un efecto de dilución y desplazando los picos de contaminación. A pesar de lo anterior, el ARd afluente al sistema biológico continuó siendo catalogada entre media y débil concentración al comparar los rangos predominantes de DQO, DBO_5 y SST con los límites establecidos por Metcalf y Eddy (2003).

En términos generales, a excepción de la alcalinidad total no se observaron diferencias significativas entre el ARd de la Fase I y ARd de la Fase II, lo que incrementó la posibilidad de comparar el desempeño de los sistemas al eliminar la calidad del ARd como una fuente de interferencia en los resultados obtenidos. Al comparar la composición de los afluentes al RC en cada fase (ARd Fase I y EP Fase II), se observaron diferencias significativas entre estos con un nivel de significancia de 0.05, tal diferencia responde al comportamiento esperado, dada la inclusión de la clarificación primaria. Sin embargo, las concentraciones del sustrato en el EP no llegaron a ser inhibitorias para el desarrollo de los microorganismos, que al ser comparadas con los límites que establece Metcalf y Eddy (2003) correspondieron a un ARD de débil concentración.

Finalmente, la presencia de G/A y detergentes en el ARd en concentraciones elevadas podrían tener efectos adversos sobre el desempeño del sistema, los cuales pueden ser controlados a través de la clarificación primaria, toda vez que esta disminuye el contenido de estas sustancias, desempeñando una función de homogenización y regulación de la composición del AR afluente al sistema biológico.

5.2 DESEMPEÑO DEL SISTEMA

Se analizó el desempeño del sistema a través del comportamiento de las principales variables operacionales del SLAEC y variables fisicoquímicas en el Efluente Secundario (ES), licor mixto y lodo de purga.

5.2.1 Variables operacionales

Las variables operacionales en el SLAEC están relacionadas con los factores que afectan el metabolismo de los microorganismos aerobios; las más importantes son la fracción de distribución de lodo (Factor α), Tiempo de Retención Celular (TRC), Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor Mixto (SSVLM), porcentaje de recirculación de lodo (R), Relación Alimento /Microorganismo (A/M) y Carga Orgánica Volumétrica (COV). En la Tabla 5.3 se resume estadísticamente el comportamiento de estas variables. A excepción de R que se mantuvo constante (40%), las otras variables se analizan a continuación.

Tabla 5.3 Resumen estadístico de las variables operacionales

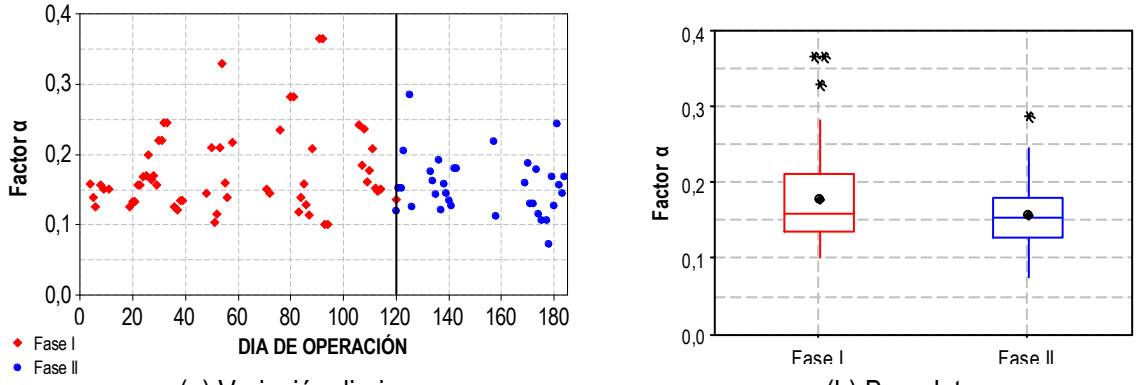
Variable	FASE I						FASE II					
	Prom.	Med.	Max.	Min.	Desv.	n	Prom.	Med.	Max.	Min.	Desv.	n
Factor α	0,18	0,16	0,28	0,10	0,06	59	0,16	0,13	0,24	0,07	0,04	34
TRC (d)	5,8	5,8	7,9	3,6	1,7	50	5,3	5,9	7,3	3,2	1,1	32
OD $_{RC}$ (mg.L^{-1})	3,1	3,0	4,3	1,2	0,9	47	2,9	2,9	4,0	2,0	0,6	30
OD $_{RE}$ (mg.L^{-1})	3,0	2,7	4,8	1,4	0,9	46	2,8	2,7	3,9	1,2	0,7	30
Temperatura RC (ºC)	-	26,9	29,3	24,7	1,1	46	-	27,35	29,9	24,9	0,9	46
Temperatura RE (ºC)	-	27,5	28,5	25,5	0,9	29	-	27,8	28,9	25,4	0,7	30
SSVLM $_{RC}$ (mg.L^{-1})	1.306	1.270	2.340	470	427	59	1.300	1.250	1.990	740	330	34
SSVLM $_{RE}$ (mg.L^{-1})	2.935	2.740	4.200	1.500	863	59	3.557	3.542	5.480	2.180	1.021	34
SV$_{RECIRCULACIÓN}$ (mg.L^{-1})	3.879	3.680	9.600	160	2.165	58	4.710	4.675	6.820	2670	1.184	34
SV$_{PURGA\ PRINCIPAL}$ (mg.L^{-1})	4.392	4.143	6.980	1.600	1.507	52	5.186	5.300	7.760	1.962	1.476	29
SV$_{PURGA\ SECUNDARIA}$ (mg.L^{-1})	4.207	4.160	11.720	346	2.741	46	5.685	5.500	10.100	1.680	2.504	24
SV$_{FLOTANTE}$(mg.L^{-1})	5.649	4.738	10.262	1.364	3.886	37	7.713	6.132	16.124	2.460	4.091	19
SV$_{ESPUMA}$ (mg.L^{-1})	6.083	4.624	13.380	1.420	3.838	24	-	-	-	-	-	-
Relación A/M	0,71	0,71	1,65	0,22	0,32	59	0,43	0,35	0,70	0,25	0,27	34
COV	1,57	1,15	2,79	0,46	0,59	59	1,11	0,99	1,88	0,38	0,38	34

Prom.: media aritmética; **Med.:** mediana; **Max**.: máximo; **Min.:** mínimo; **Desv**.: desviación estándar; **n**: número de datos

a) FACTOR α

En la Figura 5.13 se ilustra el comportamiento del Factor α, el cual varió en un rango predominante entre 0.14 y 0.21 en la Fase I, y entre 0.13 y 0.18 en la Fase II. De acuerdo con Sarioglu et al. (2003) estos valores promovieron las condiciones para favorecer la rápida adsorción física del sustrato coloidal en RC y la degradación enzimática y uso en RE, dado que no superaron el umbral de 0.30 recomendado para el SLAEC. Por otro lado, los valores referidos son similares a los reportados por

Vásquez et al. (2011) quienes con valores entre 0.1 y 0.2 obtuvieron buenas eficiencias en la reducción de M.O, lo que ratifica que para la calidad de ARd incluso para el EP, el sistema opera adecuadamente con esta relación de sólidos.



(a) Variación diaria (b) Box-plot

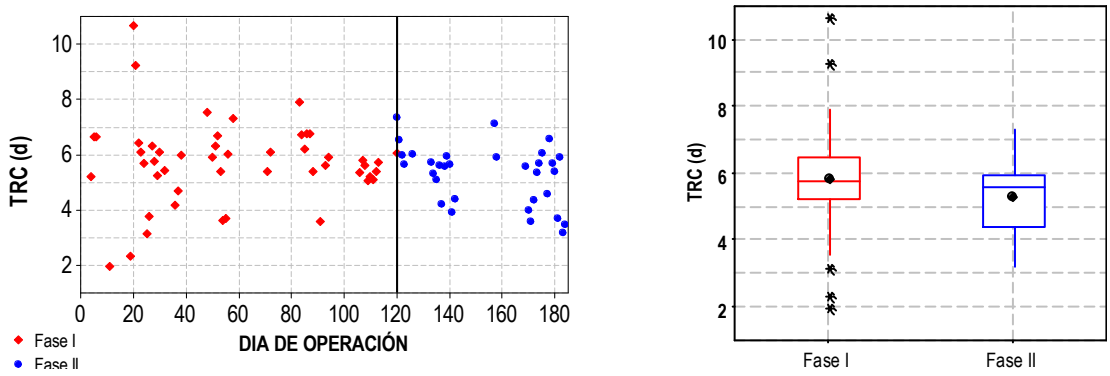
Figura 5.13 Factor α

Estadísticamente, los resultados obtenidos con la ausencia de la clarificación primaria no generaron evidencia suficiente para concluir que el promedio del Factor α en las dos fases fuera diferente ($p>0.05$), es decir que la distribución de sólidos en el sistema no fue afectada por las características del sustrato. De otro lado, el hecho de que las condiciones de estabilidad del sistema en las dos fases se hayan alcanzado con una distribución de sólidos similar, representó una ventaja para el sistema durante la Fase sin clarificación primaria, principalmente porque concentrar la mayor parte de la biomasa del sistema en el RE, permitió recuperar rápidamente su estabilidad, sugiriendo de esta forma que los efectos de la ausencia de la función amortiguadora y homogenizadora que desempeñó la clarificación primaria en la Fase II, pudieron ser parcialmente suministrados en la Fase I, por la distribución de sólidos en el sistema, ya que menos del 20% de la biomasa activa concentrada en el RC estuvo expuesta a tales efectos.

b) TRC

El TRC varió en un rango predominante entre 5.2d y 6.4d durante la Fase I y entre 4.4d y 5.9d en la Fase II, tal como se ilustra en la Figura 5.14. Los valores reportados se acercaron a la condición operacional previamente establecida (6d), la cual fue recomendada por Vásquez et al. (2011) quienes establecieron que para el SLAEC ese valor de TRC es suficiente para permitir la reducción de MO carbonácea, empleando como sustrato el EP de la PTAR-C.

Estadísticamente el promedio del TRC es comparable entre las dos Fases, la prueba de hipótesis de comparación de medias mostró que el promedio del TRC de la Fase I no fue significativamente diferente del promedio del TRC de la Fase II en un nivel de significancia mayor a 0.05, por lo que se infiere que el efecto del TRC como factor determinante en el desempeño del SLAEC fue el mismo en las dos fases, proporcionando similitud entre las condiciones bajo las cuales se desarrollaron las reacciones de síntesis y transformación de la MO.



(a) Variación diaria (b) Box-plot

Figura 5.14 Tiempo de Retención Celular (TRC)

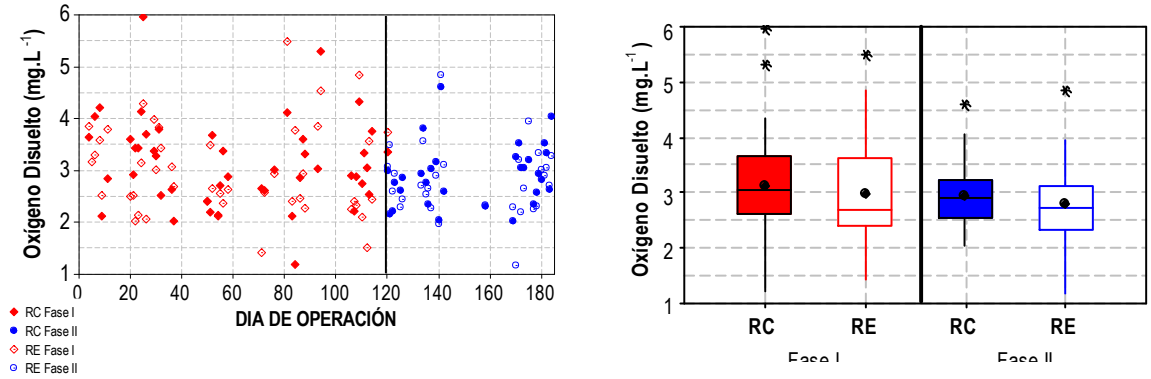
De acuerdo con van Haandel y van der Lubbe (2007), la ocurrencia de TRC muy bajos (< 2 d) promueve la presencia de bacterias libres en el efluente del sistema biológico, bajo esta condición los predadores de este tipo de microorganismos no tienen suficiente tiempo de residencia para desarrollarse, por lo que disminuye la calidad del efluente. Como en el sistema evaluado ocurrieron con baja frecuencia TRC muy bajos, especialmente en la Fase I, se puede inferir que la calidad el Efluente Secundario (ES) no fue alterada por este tipo de eventos.

Operacionalmente se presentaron diferencias en las maniobras para controlar el TRC a través de la descarga o purga de lodo de exceso. Las fluctuaciones en las concentraciones de SV en el lodo de purga ocasionaron que se incurriera en imprecisiones al momento de estimar el volumen de lodo de exceso, lo que se reflejó en TRC tan bajos como 3 d y altos como 9d, especialmente durante la Fase I. Las fluctuaciones en las concentraciones de SV se asociaron con la presencia de descargas contaminantes no controladas como surfactantes, grasas y aceites (G/A) alterando el desempeño del sistema, específicamente el desempeño del sedimentador secundario.

Aunque van Haandel y van der Lubbe (2007) anotan que la concentración de sólidos en el lodo sedimentado es independiente de la concentración afluente, en este caso la concentración del licor mixto procedente del RC probablemente contenía partículas que interfirieron con los proceso de sedimentación en el SS, el efecto de este tipo de partículas fue potenciado por la ausencia de la clarificación primaria, dado que en la Fase donde se incluyó este tratamiento, los eventos asociados con lodo de mala calidad como son esponjamiento, flotación de lodo y espumas disminuyeron considerablemente, permitiendo un mejor control del TRC.

c) OXÍGENO DISUELTO

El la Figura 5.15 se ilustra el comportamiento del OD en las dos Fases experimentales y en cada uno de los reactores. En todos los casos el valor promedio fue mayor a 2.0 $mg.L^{-1}$, lo cual indicó que se garantizaron condiciones aerobias para el adecuado desarrollo de la actividad microbiana. La ocurrencia de valores elevados se asoció con aquellas condiciones donde la concentración de SSV ó de MO disminuyó bruscamente, dejando en el medio oxígeno en cantidad superior a la demandada.



(a) Variación diaria (b) Box-plot

Figura 5.15 Oxígeno Disuelto

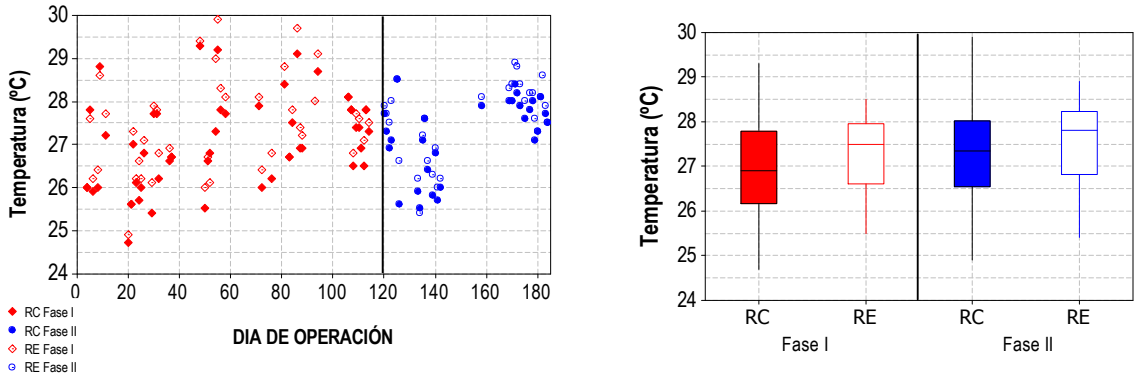
De acuerdo con Akyurek et al. (1999) el crecimiento de la biomasa en el tanque de aireación es altamente dependiente del nivel de OD. Ya que no se encontraron diferencias significativas entre el promedio de OD en RC y RE de cada una de las Fases, se esperaba un crecimiento similar de la biomasa en el RC de la Fase I comparado con el RC de la Fase II, puesto que las condiciones para favorecer la rápida adsorción física del sustrato en este reactor (factor α) y la proporción de MO en forma disuelta fueron similares.

Un comportamiento contrario se esperaba en el RE, ya que el crecimiento de la biomasa en este reactor estuvo influenciado además del nivel de OD, por la presencia de sustrato sedimentable que ingresó en la Fase I producto de la ausencia de la clarificación primaria. De acuerdo con Okutman et al. (2001) la hidrólisis de este tipo de sustrato es 40% más lento que el asociado con la MO lentamente biodegradable (MO particulada) en el ARD. Sarioglu et al. (2003) afirman que el mecanismo de hidrólisis de la MO en el SLAEC se desarrolla en el RE, por lo que bajo condiciones similares de OD y TRH, se esperaba que el crecimiento de la biomasa en el RE de la Fase I, no fuese similar entre las fases.

d) TEMPERATURA EN EL LCIOR MIXTO

El la Figura 5.16 se ilustra el comportamiento de la temperatura en el licor mixto de cada uno de los reactores. En el licor mixto predominó un rango de temperatura entre 26.1 y 28.2 ºC, estos valores se encuentran dentro del rango óptimo en el cual se favorece la cinética de crecimiento de los microorganismos mesofilicos. Autores como Metcalf y Eddy (2003) sugieren que los sistemas biológicos deben ser operados en un rango de temperatura entre 25 y 35ºC, por lo que se infiere que el rango de temperatura que predominó en los reactores biológicos (RC y RE) no fue un factor limitante y diferenciador de los resultados obtenidos, por el contrario promovió junto con el rango de pH un ambiente óptimo para las reacciones de síntesis y asimilación de MO.

Estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre la temperatura promedio del licor mixto del RC de la Fase I y II, ni entre el icor mixto del RE, ello sugiere que los efectos derivados de esta variable sobre el desempeño del sistema fueron similares en las dos fases.

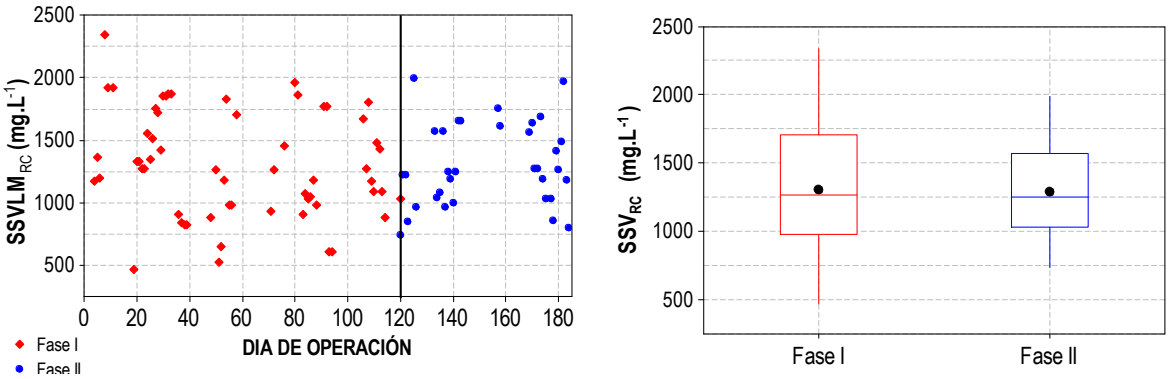


(a) Variación diaria (b) Box-plot

Figura 5.16 Temperatura del licor mixto

e) SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN LICOR MIXTO EN EL RC

En la Figura 5.17 se ilustra el comportamiento de los SSVLM en el RC. Durante la Fase I los SSVLM variaron entre 980 y 1.710 $mg.L^{-1}$ y en la Fase II entre 1.030 y 1.570 $mg.L^{-1}$, estos rangos predominantes se ubicaron dentro de los límites recomendados por Rittman y McCarty (2001) y Orozco (2003) para esta modalidad de lodos activados. Estadísticamente no se observaron diferencias significativas entre el promedio de los SSVLM en el RC de la Fase I y Fase II, este resultado puede ser explicado a través de las características de los afluentes a esta unidad, ya que el aporte de sólidos por parte del crecimiento de biomasa debe ser poco significativo, una vez que los mecanismos predominantes en el RC son la adsorción del sustrato soluble y almacenamiento del sustrato particulado.



(a) Variación diaria (b) Box-plot

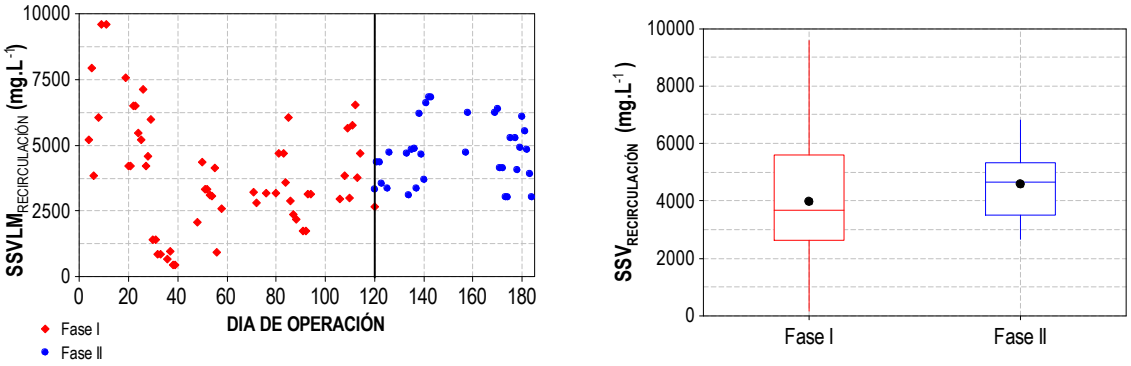
Figura 5.17 Sólidos Suspendidos Volátiles en Licor Mixto del RC

Por lo anterior, la concentración de SSVLM en el RC depende del contenido de MO presente en el afluente y de la concentración de SSV en el licor mixto que era recirculado desde el RE. En la Fase I el contenido de DQO y DBO_5 afluente al RC fue mayor en comparación con la Fase II, pero la concentración de SSVLM proveniente del RE fue menor en la Fase I comparada con la Fase II, la combinación de las características de estos afluentes al RC generó que la concentración de SSV en el licor mixto de esta unidad, fuese similar en las dos fases.

Por otro lado, se observó mayor variación en la concentración de SSVLM en el RC de la Fase I, este comportamiento fue atribuido tanto a la menor concentración que presentaron los SSVLM en el RE (Figura 5.19) como a la presencia de detergentes en el ARd. Jenkins et al. (2004) asociaron la variación y disminución en la fracción volátil del lodo activado en un SLA con la presencia de surfactantes en el AR; un fenómeno similar pudo presentarse en el RC en la Fase I pues se evidenciaron algunos eventos de formación de espuma jabonosa el licor mixto de esta unidad, durante estos eventos se presentó un fenómeno de "lavado de la biomasa", en el que era notable la disminución en la concentración de SSVLM. Operacionalmente, estos eventos fueron controlados deteniendo el ingreso de ARd (purga de desarenadores) y con la puesta en batch con recirculación del sistema, mientras se eliminaba la espuma y el RC adquiría una mejor concentración de biomasa.

f) SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN LICOR MIXTO EN EL LODO RECIRCULADO

En la Figura 5.18 se ilustra el comportamiento de los SSV en el lodo recirculado hacia el RE. Durante la Fase I predominaron concentraciones entre 2.633 y 5.595 $mg.L^{-1}$ con un valor promedio de 3.975 $mg.L^{-1}$, en la Fase II el rango predominante varió entre 3.498 y 5.340 $mg.L^{-1}$ con un valor promedio de 4.588 $mg.L^{-1}$. Se observó una gran variación en la concentración de SSV en la recirculación de lodo durante la Fase I revelando variaciones en el desempeño del sedimentador secundario.



(a) Variación diaria (b) Box-plot

Figura 5.18 Sólidos Volátiles en la recirculación de lodo

Estadísticamente la concentración promedio de SSV en la recirculación de lodos varió significativamente entre las Fases evaluadas, con un nivel de significancia menor a 0.05. Durante la Fase II se obtuvo una mayor concentración de SSVLM en el lodo recirculado, lo que se relacionó con un mejor desempeño del SS en esta Fase. En el proceso anterior a la sedimentación secundaria, es decir en el RC no se observaron diferencias significativas en torno a la concentración promedio de SSVLM, es decir la diferencia en la calidad de los sólidos recirculados fue promovida por los procesos que tienen lugar en el SS.

Una de las funciones del SS es transformar el licor mixto en un lodo activado de mayor concentración, lo cual se logra permitiendo la unión o aglomeración del floc biológico; a través de las

variables fisicoquímicas la eficiencia de este proceso se expresa con el aumento en la concentración de los SST y SSV, para lo cual es necesario un buen equilibrio entre los procesos de agregación y desagregación del floc biológico. De acuerdo con los resultados obtenidos se infiere que la presencia de material sedimentable alteró los procesos de compactación ó densificación del lodo, lo cual derivó en un menor desempeño del sedimentador secundario (SS) en la Fase I, este planteamiento contradice lo expuesto por Hernández (2008) y Wilén et al. (2008) quienes afirman que la ausencia de la clarificación primaria podría tener un efecto positivo sobre las propiedades de separación sólido - líquido del floc en los SLA.

La ausencia de la clarificación primaria en la Fase I permitió el ingreso de material particulado (biodegradable y no biodegradable) al RC; la baja eficiencia en la reducción de SST que expresó la clarificación primaria en la Fase II denotó que una fracción del material particulado en ARd presentaba mala sedimentabilidad y que probablemente su retención fue producto de los mecanismo de arrastre que caracterizan a los procesos de sedimentación, bajo este escenario existe un alta probabilidad que en la Fase I el material particulado biodegradable haya sido almacenado en el floc biológico para su posterior transformación en el RE, pero el material particulado no biodegradable que no fue almacenado en el floc biológico, fue transportado hacia el SS donde su baja capacidad para sedimentar cobró mayor importancia, ya que la baja capacidad para sedimentar denota una baja tendencia a aglomerarse y formar partículas más grandes, según lo afirma Droste (1997).

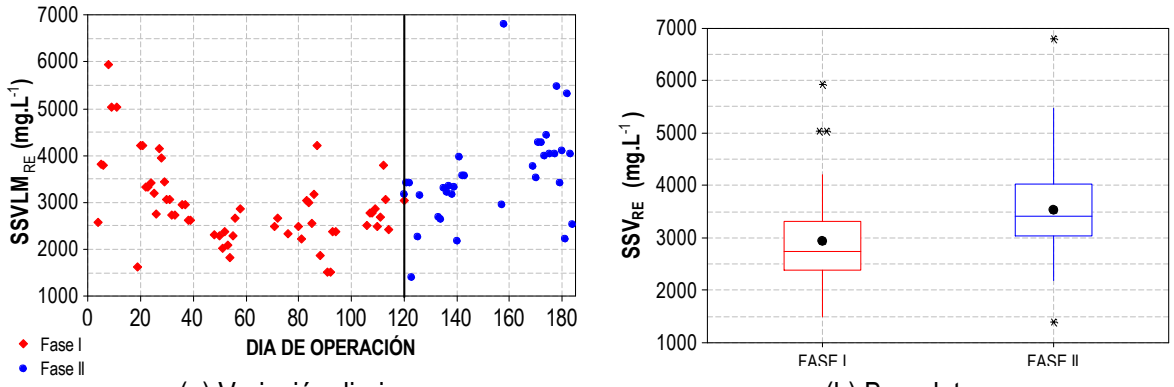
Sumado a lo anterior, la presencia de G/A y detergentes en el ARd en concentraciones inhibitorias crearon las condiciones para favorecer los procesos de desagregación de floc. De acuerdo con Gerardi (2002) la presencia de surfactantes en el AR provoca el crecimiento de biomasa dispersa y floc débil con pobres características de asentamiento, las cuales permiten explicar las variaciones observadas en el desempeño del SS en torno a la compactación de los sólidos en el lodo recirculado hacia el RE.

g) SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES EN LICOR MIXTO EN EL RE

Con relación a los SSVLM en el RE, en la Fase I variaron entre 2.380 y 3.320 $mg.L^{-1}$ y en la Fase II entre 3.040 y 4.030 $mg.L^{-1}$ (ver Figura 5.19), aunque estos rangos son inferiores a los recomendados por Rittman y McCarty (2001) y Orozco (2003), la proporción entre los SSVLM de RE y RC en promedio fue de 2.4 para la Fase I y 2.9 para la Fase II, comportamiento acorde con lo sugerido por Sarioglu et al. (2003) quienes recomiendan que esta relación se encuentre entre 2 y 3 para promover la separación de los mecanismos de asimilación y transformación de MO.

Estadísticamente se encontraron diferencias significativas entre el promedio de los SSVLM en el RE de la Fase I y Fase II en un nivel de significancia menor a 0.05. El caudal de recirculación de lodos y la inyección de OD son los afluentes a esta unidad. En torno al nivel de OD no se observaron diferencias significativas que pudieran promover diferencias en el desempeño del RE, sin embargo, la concentración de SSVLM en la recirculación de lodos presentó diferencias entre una fase y otra,

por lo que las diferencias observadas en la concentración de SSVLM en el RE son atribuibles a este fenómeno.



(a) Variación diaria (b) Box-plot

Figura 5.19 Sólidos Suspendidos Volátiles en Licor Mixto del RE

Por la configuración del SLAEC, el crecimiento de la biomasa producto de la transformación y estabilización del sustrato almacenado en el floc biológico tiene lugar en el RE. Durante la Fase I, la ausencia de la clarificación primaria permitió que a este reactor ingresaran sólidos de naturaleza biodegradable, Okutman et al. (2001) sugieren que la tasa de hidrólisis de este tipo de material es 40% más lenta en comparación con el sustrato lentamente biodegradable ó particulado, esta condición sumada al menor ingreso de biomasa medida a través de los SSVLM en comparación con el RE de la Fase II, pueden explicar porque en el RE de la Fase I la concentración promedio de SSVLM fue menor frente a la Fase II.

Lo anterior indicó que aún cuando la ausencia de clarificación primaria incrementó en un 32% la MO biodegradable, el sistema no tradujo este incrementó de sustrato en una mayor cantidad de biomasa, probablemente el TRH en el RE no fue suficiente para que el proceso de hidrólisis de este tipo de sustrato tuviese lugar en esta unidad, ya que su tamaño (mayor al sustrato particulado) lo hace de difícil degradación por lo que podría requerir un tiempo mayor para alcanzar su estabilidad.

h) SÓLIDOS VÓLATILES EN EL LODO DE PURGA

En la Figura 5.20 se ilustra el comportamiento de los SV en cada uno de los puntos de purga de lodo en el sedimentador secundario. En general, las concentraciones de SV que conformaron el lodo de exceso del sistema variaron en un rango predominante entre 1.823 y 12.020 mg.L^{-1}, las concentraciones más bajas fueron propias del lodo de exceso del punto de purga secundaria, mientras que los valores altos estuvieron asociados al punto de purga denominado “Espuma” en la Fase I y “Flotante” en la Fase II, este tipo de lodo es característico de sistemas con problemas operacionales relacionados con las características de sedimentabilidad del lodo. La gran variación en la concentración de SV en el lodo flotante durante la Fase II explica las fluctuaciones o dificultades presentadas para controlar el TRC durante esta Fase.

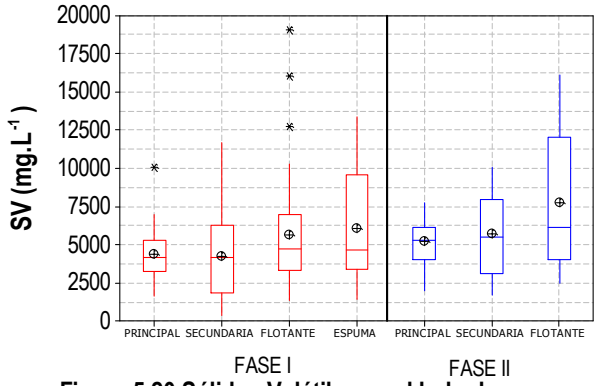
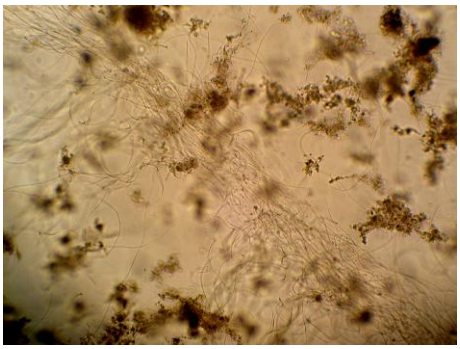
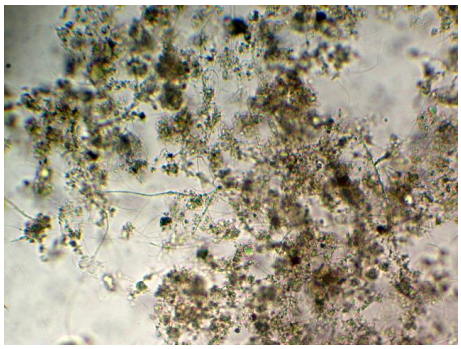


Figura 5.20 Sólidos Volátiles en el lodo de purga

En la Fase sin clarificación primaria se presentaron reiteradamente eventos de "Foaming" o espumamiento biológico. De acuerdo con Vilaseca (2001) los microorganismos filamentosos producen una espesa espuma coloreada, blanca o marrón y en muchos casos abundantes flotantes en el sedimentador secundario, aunque la microscopia no mostró evidencia de este tipo de microorganismo, si reveló presencia de filamentos en el RC que no permitían la aglomeración del floc biológico y que podrían haber generado los eventos de "Foaming" en la Fase I, contrario a la observado en la Fase II donde una menor presencia de filamentos contribuía con la unión y aglomeración del floc, tal como se ilustra en la Figura 5.21.



(a) Abundancia de filamentos en el RC – Fase I



(b) Menor presencia de filamentos en el RC – Fase II

Figura 5.21 Presencia de filamentos en el RC

Las espumas que por sus pobres características de sedimentabilidad eran purgadas del sistema, presentaron una alta concentración de SV entre 2.600 y 9.500 $mg.L^{-1}$, es decir que este tipo de lodo concentró una fracción significativa de la biomasa del sistema durante la Fase I. La ausencia de espumas cuando se incluyó la clarificación primaria se relacionó con mejores condiciones ambientales.

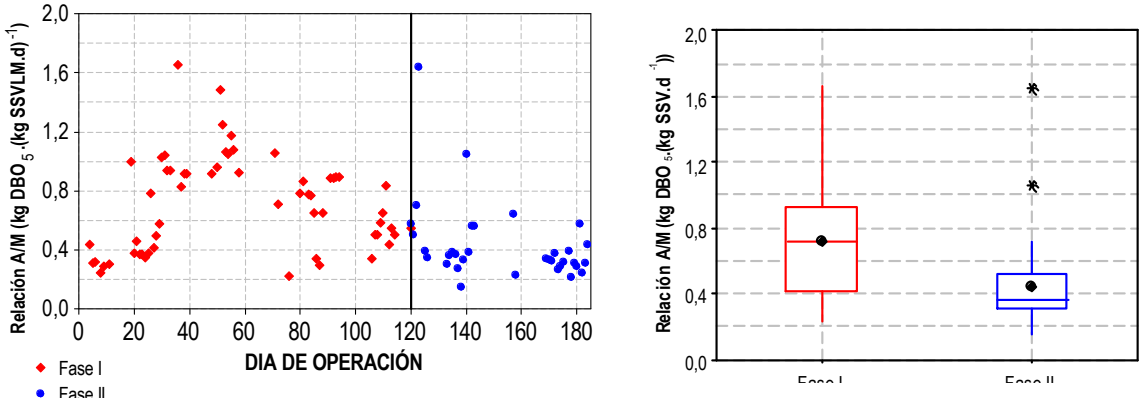
La comparación estadística de la concentración promedio de SV de cada punto de purga del sedimentador secundario, mostró que existieron diferencias significativas entre la purga principal, purga secundaria de la Fase I y lodo flotante de la Fase II, entre los otros puntos no existieron

diferencias significativas. Lo anterior indica que la configuración del sedimentador secundario tuvo baja influencia sobre los resultados obtenidos, ya que los puntos de purga principal y secundaria de los cuales se esperaba retirar el lodo exceso en condiciones óptimas de operación, no presentaron diferencias significativas en la concentración de lodo.

De otro lado, el lodo flotante y espumas de los cuales se esperaba una baja incidencia, resultaron siendo significativos en el desempeño y operación del sistema; la ausencia de la clarificación primaria fue el factor diferenciador de la composición del AR afluente al RC y el agente que promovió el ingreso de sólidos inertes, sedimentables, G/A y detergentes al sistema durante la Fase I, por lo que se infiere que las diferencias observadas fueron causadas principalmente por esta condición, lo cual se ratificó en la Fase II cuando se minimizaron las espumas en el sedimentador secundario con la inclusión de la clarificación primaria. De acuerdo con Jenkins et al. (2004) las espumas revelan la presencia de surfactantes no biodegradables y *Norcaadia spp,* los principales efectos de este problema son la gran cantidad de sólidos sobre la superficie de las unidades de tratamiento y la acumulación y putrefacción del lodo, lo cual se traduce en problemas de separación del lodo, posiblemente como los que presentó el sedimentador secundario en la Fase I.

i) RELACIÓN A/M y COV

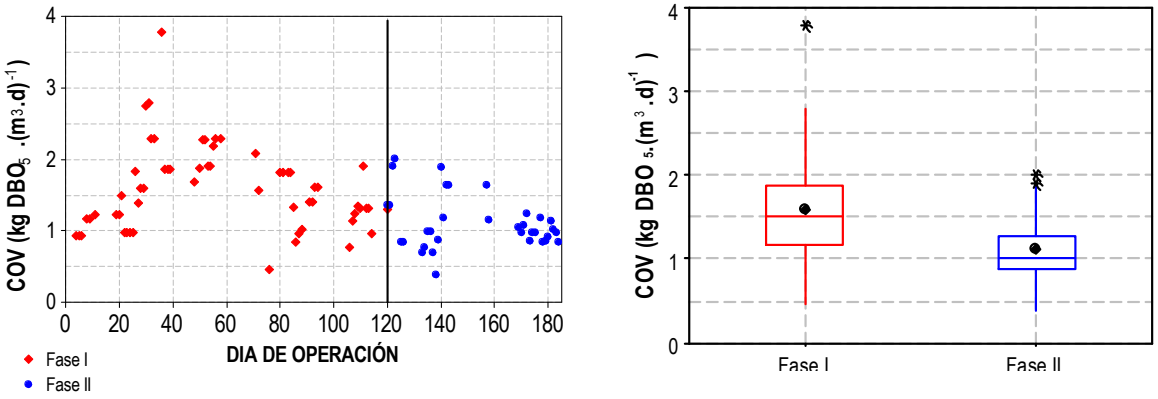
En la Figura 5.22 y 5.23 se ilustra el comportamiento de la Relación A/M y la COV respectivamente. De manera general se observó que durante la Fase I, tanto la relación A/M como la COV aplicada al sistema biológico fueron mayores en comparación con la Fase II, comportamiento causado por la ausencia de la clarificación primaria en la Fase I, que promovió una mayor cantidad MO afluente al RC.



(a) Variación diaria (b) Box-plot

Figura 5.22 Relación A/M

Estadísticamente estas variables difieren de una Fase a otra con un nivel de significancia menor a 0.05. Durante la Fase I, la relación A/M varió entre 0.41 y 0.92 kg DBO_5.(kg SSV)$^{-1}$, mientras que en la Fase II esta relación varió entre 0.30 y 0.52 kg DBO_5.(kg SSV)$^{-1}$; en esta última Fase los valores se encontraron dentro de los límites recomendados para el SLAEC, como lo sugieren Benefield y Randall (1981) y Rittman y McCarty (2001).



(a) Variación diaria (b) Box-plot

Figura 5.23 Carga Orgánica Volumétrica

Por el contrario, durante la Fase I la ausencia de la clarificación primaria promovió una mayor carga orgánica aplicada que se tradujo en una relación A/M superior a los límites recomendados. De acuerdo con Ramalho (1996) relaciones de A/M elevadas (por ejemplo, entre 0.6 y 1.0 kg DBO_5.(kg SSTLM.d)$^{-1}$) fomentan los procesos de respiración endógena dado que hay una menor disponibilidad de nutrientes, lo cual conlleva al predominio de microorganismos de naturaleza filamentosa que provocan la inflación del lodo e impiden la sedimentación al permanecer casi continuamente en suspensión.

En la Fase I los análisis de microscopia no revelaron la presencia de organismos filamentosos, sin embargo se presentaron reiteradamente eventos de esponjamiento y flotación del lodo, que pudieron estar asociados en gran medida con las condiciones de sobrecarga orgánica, tal como lo refiere Ramalho (1996); otros factores como la presencia de detergentes y G/A en el afluente contribuyeron en el desarrollo de estos eventos.

Por otro lado, el rango de variación tanto de la relación A/M como de la COV fue mayor en la Fase I, lo cual indicó que la clarificación primaria durante la Fase II, desempeñó una función de control y regularización de la calidad del EP (afluente al sistema biológico), aspecto que contribuyó con una mayor estabilidad del sistema. De acuerdo con Sanin et al. (2006) las fluctuaciones en la relación A/M afectan la fisiología microbiana, valores de la relación A/M mayores alteran la calidad y capacidad de biofloculación del lodo, promoviendo un floc biológico con pobres características de sedimentabilidad. En este sentido Eriksson et al. (1992) citado por Wilen et al. (2008) sugieren que cuando la carga orgánica se incrementa se estimula el crecimiento disperso o se aumenta la tasa de crecimiento en la superficie exterior del floc biológico lo que debilita al floc, este fenómeno ayudaría a explicar porque las propiedades de agregación del floc biológico disminuyeron durante la Fase I, traduciéndose como se mencionó anteriormente en una menor concentración de SSVLM en el lodo recirculado.

Una vez presentado el comportamiento de las principales variables operacionales se infiere que bajo condiciones ambientales similares, la inclusión de la clarificación primaria durante la Fase II generó una respuesta diferente en el desempeño del sistema, sin embargo estas diferencias solo fueron medibles a través de las propiedades o características de la biomasa, empleando para ello la concentración de SSVLM en cada reactor, así como los SV en los puntos de purga de lodo secundario. El desempeño del sistema pudo ser alterado por cambios en la composición de la biomasa formada, específicamente en aquellas aspectos que se derivan de la capacidad de bioflocculación del floc biológico, como son las características de sedimentabilidad.

La naturaleza del sustrato sedimentable junto con la presencia de G/A y detergentes en el ARd en la Fase I, alteraron los procesos de agregación del floc biológico; el efecto conjunto de estos eventos fue señalado anteriormente por Ullrich y Smith (1957) para la PTAR de Austin – Texas.

5.2.2 Variables fisicoquímicas del ES

El desempeño del sistema a través de la medición de las variables fisicoquímicas en el efluente secundario (ES) se resume estadísticamente en la Tabla 5.4.

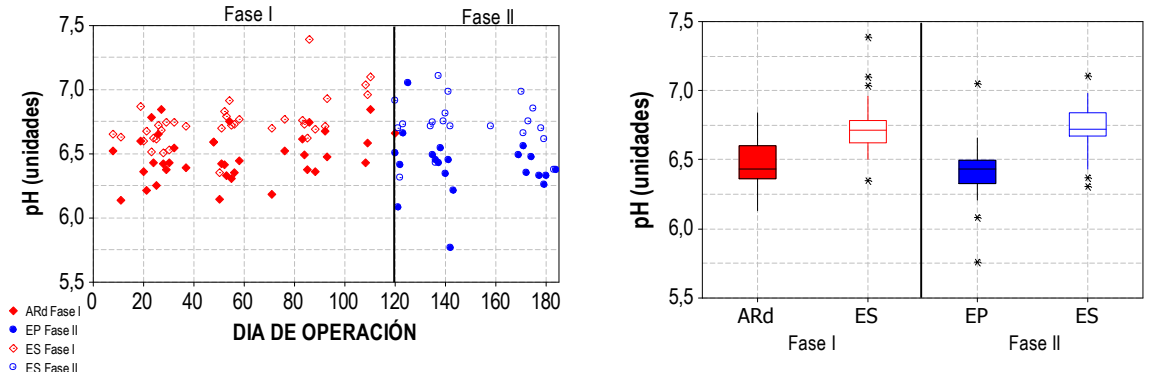
Tabla 5.4 Resumen estadístico de las características del ES

Variable Fisicoquímica	FASE I						FASE II					
	ES						ES					
	Prom.	Med.	Max.	Min.	Desv.	n	Prom.	Med.	Max.	Min.	Desv.	n
pH (unidades)		6,71	6,96	6,50	0,19	36		6,72	6,98	6,43	0,20	20
Alcalinidad total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	114	114	154	65	25	33	96	93	125	54	33	13
DQO T ($mg.L^{-1}$)	54	50	96	18	24	59	42	39	78	15	17	34
DBO_5 T ($mg.L^{-1}$)	36	33	75	12	19	18	26	24	38	12	10	14
SST ($mg.L^{-1}$)	18	16	38	4	12	59	20	19	34	4	11	34

Prom.: media aritmética; **Med.:** mediana; **Max**.: máximo; **Min.:** mínimo; **Desv**.: desviación estándar; **n**: numero de datos

a) pH

El pH del efluente secundario presentó valores similares en las dos fases con un rango predominante entre 6.6 y 6.8 unidades, tal como se ilustra en la Figura 5.24. La reducción biológica de la MO incrementó los valores de pH en el ES en comparación con el afluente al RC; de acuerdo con Ghanizadeh y Sarrafpour (2001) este comportamiento es promovido por la liberación de SPE durante la asimilación y transformación de la MO, estas sustancias generalmente tienen carga negativa por lo que un incremento en su producción resulta en un incremento del pH por encima del punto isoeléctrico, el cual en la mayoría de las bacterias se encuentra a pH de 7.0 unidades. Este comportamiento induce la capacidad de enlace entre las células bacterianas, lo que finalmente mejora los procesos de floculación biológica.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.24 pH del ES

Estadísticamente no se observaron diferencias significativas entre el pH del ES de cada fase, lo que sugiere que la ausencia de la clarificación primaria no tuvo efectos adversos sobre la producción enzimática, específicamente sobre los procesos de asimilación y transformación de la MO, el comportamiento de esta variable en gran medida responde al desempeño de estos procesos.

Con relación al pH del licor mixto se observó una marcada tendencia a conservarse en un rango poco variable con valores entre 6.3 y 6.6 unidades, tal como se ilustra en la Figura 5.25. De lo anterior se infiere que el pH del licor mixto (RC y RE) se aproximó a un valor neutro y en general, fomentó un ambiente favorable para el desarrollo de los microorganismos. Aunque se presentaron algunos eventos en los cuales el valor del pH en el RC de la Fase I descendió hasta valores de 4.53 unidades y en el RC de la Fase II hasta 4.05 unidades, causados por las fluctuaciones de pH en el AR, las cuales fueron atribuidas a la presencia de sustancias no controladas; durante estos eventos se implementaron medidas a nivel operacional para proteger la estabilidad del sistema, entre estas medidas se destaca el by-pass de la planta piloto.

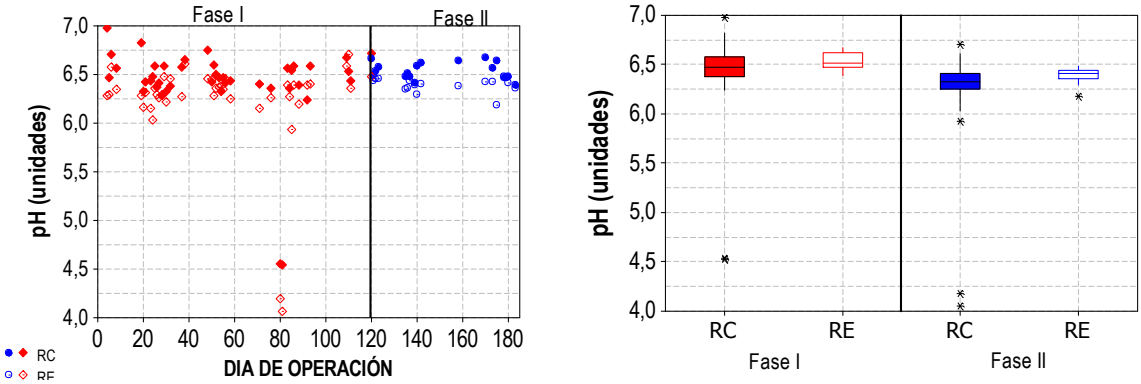


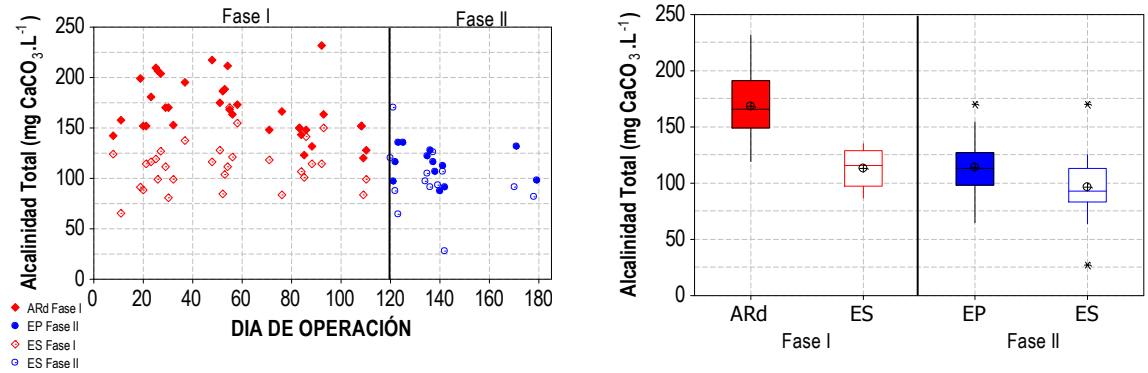
Figura 5.25 pH del licor mixto

En las dos Fases se observó una tendencia a que el pH del licor mixto del RE presentara una menor variación en comparación con el pH del licor mixto del RC, aspecto debido a que el licor mixto del RE

no está en contacto directo con el AR afluente, por lo que las fluctuaciones en la calidad del AR no lo afectaron significativamente.

b) Alcalinidad total

La alcalinidad total en el ES presentó un rango predominante entre 97 y 129 mg $CaCO_3.L^{-1}$ con un promedio de 113 $CaCO_3.L^{-1}$ durante la Fase I y entre 84 y 113 mg $CaCO_3.L^{-1}$ con un promedio de 96 mg $CaCO_3.L^{-1}$ durante la Fase II, tal como se ilustra en la Figura 5.26.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.26 Alcalinidad total del ES

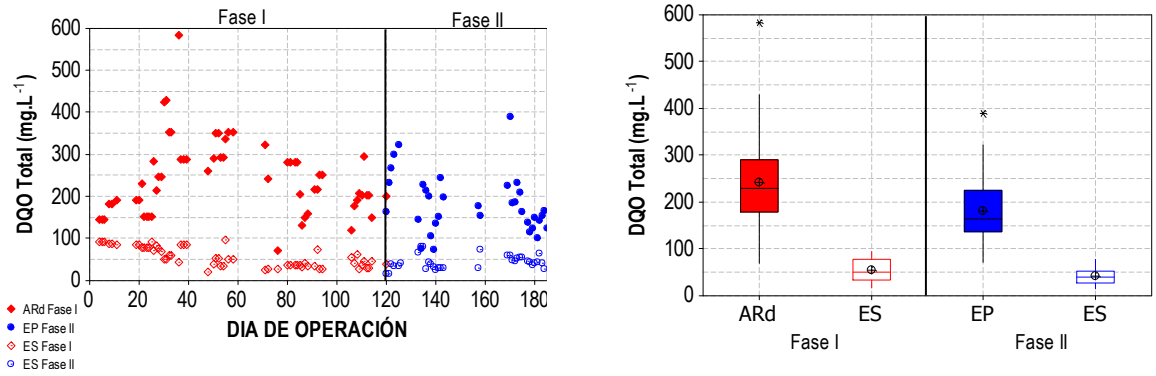
La transformación y asimilación biológica de MO generó un disminución promedio del 33% y 15% de la alcalinidad total durante la Fase I y II respectivamente, la diferencia pudo ser promovida por el ingreso del sustrato sedimentable durante la ausencia de la clarificación primaria, anteriormente se anotó que este proceso redujo por separación física el 12% de la alcalinidad total presente en el ARd durante la Fase II y ahora se anota que durante esta misma Fase, el 15% de la alcalinidad total presente en el EP fue consumido para la neutralización de los ácidos liberados en el tratamiento biológico, la suma de estos porcentajes es comparable con el 33% de alcalinidad disminuida en la Fase I, es decir que la acción biológica de adsorber las partículas sedimentables y posteriormente su decantación a través de la sedimentación secundaria, generó un efecto similar al proporcionado por la acción de la clarificación primaria en acción conjunta con el tratamiento biológico y el sedimentador secundario.

Estadísticamente no se observaron diferencias significativas entre el promedio de alcalinidad total del ES de Fase I y Fase II, por lo que se infiere que el efecto de la clarificación primaria sobre la calidad del ES en términos de esta variable, fue proporcionado en igual medida por el sedimentador secundario (SS) durante la Fase I, principalmente sobre los sólidos inorgánicos, los cuales han sido relacionados con el contenido de alcalinidad total en el ARD por autores como Jenkins et al. (2001) y Davis y Harshman (1991).

c) DQO total y DBO_5

La transformación de la MO fue seguida a través del la DQO y DBO_5; en la Figura 5.27 se observa que durante la Fase I en el ES predominaron concentraciones de DQO entre 35 y 78 $mg.L^{-1}$ con un promedio de 54 $mg.L^{-1}$, mientras que en la Fase II predominaron concentraciones entre 28 y 53

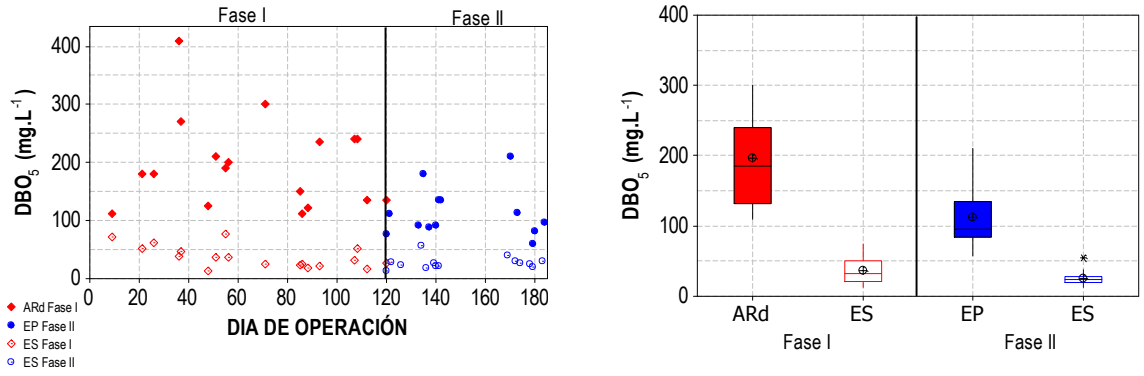
mg.L^{-1} con un promedio de 42 mg.L^{-1}. Con relación a la DBO_5, el ES presentó valores entre 22 y 50 mg.L^{-1} con un promedio de 36 mg.L^{-1} durante la Fase I y entre 20 y 28 mg.L^{-1} con un promedio de 26 mg.L^{-1} durante la Fase II, tal como se presenta en la Figura 5.28.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.27 DQO total del ES

A través del comportamiento descrito se observa que el rango de variación de la DQO y DBO_5 efluente disminuyó cuando se incluyó la clarificación primaria, indicando que cuando el afluente al RC presentó menor variación en la concentración de DQO y DBO_5, la respuesta del sistema biológico se expresó a través de una menor variación en su calidad efluente, mostrando un desempeño más estable, por lo que se infiere que la clarificación primaria además de reducir el contenido de DQO y DBO_5, también tuvo un efecto benéfico sobre la estabilidad del sistema biológico, preservando las características de biosorción del floc biológico, ya que es este mecanismo junto con el entrampamiento de material particulado, los que determinan el nivel de eficiencia con el cual el sustrato soluble y particulado es retirado de la fracción líquida en un corto de periodo de contacto.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.28 DBO_5 total del ES

Aunque la calidad del ES en términos de la DQO en las dos fases se ubicó en un rango aceptable con valores inferiores a 78 mg.L^{-1}, estadísticamente se presentaron diferencias entre el promedio de la DQO del ES en un nivel de significancia menor a 0.05, estas diferencias provienen de la respuesta

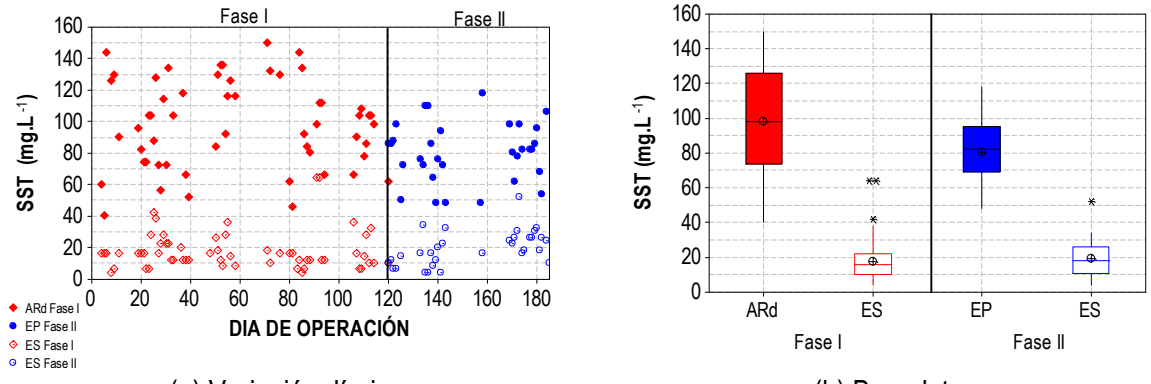
del sistema a dos sustratos (ARd Fase I y EP Fase II) los cuales anteriormente también presentaron diferencias significativas, promovidas por el arrastre de material sedimentable que ejerció la clarificación primaria.

Estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre la concentración promedio de la DBO_5 en el ES, este resultado indicó que las reacciones de biosorción responsables de la disminución del contenido de MO biodegradable cuando el AR afluente entró en contacto con el licor mixto del RC, no fueron significativamente alteradas por la ausencia de la clarificación, así mismo sugirió que la MO biodegradable en forma particulada fue atrapada y almacenada eficientemente en el floc biológico, ya que no fue evidente su presencia en el ES, lo cual permite resaltar la notable afinidad de la biomasa por el sustrato en cada fase.

De otro lado, es importante anotar que aún cuando la carga orgánica aplicada medida a través de la Relación A/M y COV representó en la Fase I entre el 60% y 70% mayor cuando es comparada con la Fase II, la calidad del ES de la primera Fase no fue alterada en esa misma proporción, por lo que se ratificó que el SLAEC es capaz de absorber de forma eficiente una mayor carga orgánica frente a las comúnmente reportadas en la literatura.

d) SST

En la Figura 5.29 se ilustra el comportamiento de los SST en el ES, durante la Fase I predominaron concentraciones entre 10 y 22 $mg.L^{-1}$ con promedio de 18 $mg.L^{-1}$ y entre 11 y 26 $mg.L^{-1}$ con promedio de 19 $mg.L^{-1}$ en la Fase II, estadísticamente no existieron diferencias significativas entre estos valores en un nivel de significancia mayor a 0.05. A partir de lo anterior, se infiere que los sólidos sedimentables que ingresaron al RC producto de la ausencia de la clarificación primaria durante la Fase I, fueron retenidos eficientemente en el floc biológico.



(a) Variación díaria (b) Box-plot

Figura 5.29 SST del ES

La similitud entre la concentración promedio de SST en el ES de cada Fase, indicó que el SLEC es capaz de retener con igual eficiencia tanto material particulado como soluble a través de la combinación de los mecanismos de biosorción y almacenamiento del floc biológico. En términos de la calidad del ES, la presencia de sólidos inertes en el AR afluente producto de la ausencia de la clarificación primaria no tuvo efectos adversos sobre los mecanismos de reducción de MO que

tuvieron lugar en el RC, sin embargo la presencia de este tipo de material adquirió importancia sobre los mecanismo que definen la compactación y adensamiento de floc en el sedimentador secundario, como se observó anteriormente.

Es importante precisar que fue en este sentido que la función de barrera de protección que desempeñó la clarificación primaria, adquirió mayor importancia en el desempeño del sistema en la Fase II, toda vez que previno el ingreso de sustancias como G/A que pudieron haber influido sobre los mecanismos de bioflocculación del floc biológico.

La composición del ARd pudo tener influencia sobre este resultado; la evaluación de la eficiencia del clarificador primario durante la Fase II mostró que bajo las condiciones de operación esta unidad removió en promedio el 33% de los SST, es decir que durante la Fase I un porcentaje similar de sólidos de naturaleza sedimentable ingreso al RC, lo cual puede considerarse como una carga de SST adicional relativamente baja, por lo que el mecanismo de entrampamiento del material particulado probablemente no fue exigido más allá de los límites de la capacidad del floc biológico.

Así mismo, las estrategias de operación que se implementaron en la Fase I tuvieron incidencia sobre la similitud en la calidad del ES en términos de los SST. En esta fase, se intensificó la frecuencia de barrido de lodos y el nivel de lodos en el sedimentador secundario fue monitoreado continuamente, estas actividades se emplearon como alertas tempranas para prevenir la pérdida de biomasa en el ES, producto de los eventos de esponjamiento y flotación del lodo secundario. Disminuir el caudal afluente hasta un porcentaje del 75% del valor de operación normal, se constituyó en la principal herramienta para controlar los eventos de esponjamiento, lo cual tuvo un efecto circunstancial sobre el TRH en el sedimentador secundario, disminuyendo la velocidad de flujo, lo cual indirectamente permitió que los sólidos con pobres características de sedimentabilidad tuviesen un tiempo mayor para decantar, por lo que su presencia no fue evidente en la calidad del ES.

Aunque la estrategia anterior fue útil para mantener la estabilidad del sistema durante la Fase I, también permitió advertir que una de las principales diferencias en el desempeño del SLAEC cuando se elimina la clarificación primaria del AR es el deterioro de las propiedades de floculación del lodo activado, las cuales pueden ser compensadas a través de la modificación de las características hidráulicas del sedimentador secundario especialmente aquellas que definen la velocidad de flujo y arrastre de partículas.

En términos generales, las concentraciones en el ES de DQO, DBO_5 y SST en las dos fases fueron comparables con las reportados por Vásquez et al.(2011) quienes emplearon a escala piloto un SLA y SLAEC para tratar el EP de la PTAR-C, desde un punto de vista práctico la similitud entre estos resultados sugiere que eliminar la clarificación primaria del ARd podría resultar ventajoso, ya que el grado de eficiencia que se sacrificó en términos de la calidad del ES fue muy bajo; sin embargo se deben incluir algunas modificaciones en el sedimentador secundario para compensar y garantizar la estabilidad del sistema.

e) Eficiencias de reducción

En la Figura 5.30 se ilustran los porcentajes de eficiencia alcanzada en el tratamiento secundario, los cuales para la Fase I fueron en promedio del orden de 78, 80 y 80% para la reducción de DQO, DBO_5 y SST respectivamente, cuando se incluyó la clarificación primaria los niveles de eficiencia fueron similares del orden de 76, 80 y 80%. Estadísticamente los niveles de eficiencia en la reducción de las variables señaladas no presentaron diferencias significativas entre cada Fase, la similitud entre los valores encontrados indicó una alta afinidad de la biomasa por el sustrato. Así mismo, que el ingreso de MO particulada y sólidos inertes no alteró la capacidad del RC para retirar en corto periodo de contacto MO carbonacea.

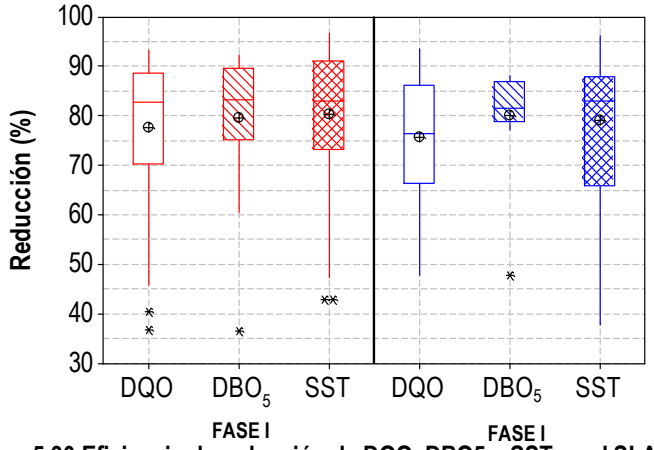


Figura 5.30 Eficiencia de reducción de DQO, DBO5 y SST en el SLAEC

Aún cuando la relación A/M en la Fase I fue superior a la aplicada en la Fase II, la eficiencia del sistema para reducir la MO determinada a través de la DQO y DBO_5, se conservó dentro de niveles similares, lo cual indicó que con el incremento de sustrato en ausencia de la clarificación primaria, los mecanismos de biosorción del floc biológico no fueron alterados y que el mecanismo de almacenamiento del floc biológico para atrapar la MO particulada respondió eficientemente.

El análisis global del desempeño del sistema hasta aquí observado, sugiere que la eliminación de la clarificación primaria del ARd no disminuyó la calidad del ES, ya que las concentraciones finales de DQO, DBO_5 y SST fueron similares en las dos Fases, tal similitud resultó de un adecuado desempeño de los mecanismos de adsorción y entrampamiento de la MO soluble y particulada, así como de la capacidad de floc biológico para atrapar el material particulado orgánico e inorgánico. Sin embargo, el ingreso de sustancias potencialmente inhibitorias de la actividad microbiana como G/A y detergentes, producto de la ausencia una barrera de control, función que desempeñó la clarificación primaria durante la Fase II, podría resultar en una gran desventaja para el equilibrio y estabilidad del sistema, dado que las propiedades de bioflocculación del floc biológico son susceptibles de ser alteradas por este tipo de sustancias. Esta propiedad del floc biológico se expresó a través de la compactación del lodo en el sedimentador secundario. Una menor concentración de los SSV en el lodo recirculado en la Fase I fue una de las formas en las cuales se manifestó la disminución o

perdida de la capacidad de bioflocculación del licor mixto, igualmente, la presencia de lodo flotante y eventos reiterados de esponjamiento del lodo secundario.

5.3 CARACTERÍSTICAS DE SEDIMENTABILIDAD Y PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS

El desempeño de los sistemas biológicos de medio suspendido, depende ampliamente de la eficiencia del sedimentador secundario para separar la fracción liquida tratada de la biomasa formada, esta eficiencia es el resultado de la configuración del sedimentador, del régimen hidráulico y de las características de sedimentabilidad del licor mixto. En este caso. la configuración del sedimentador secundario y el régimen hidráulico fueron iguales en las fases evaluadas, por lo que los efectos positivos o negativos que pudieron influir sobre el desempeño del sedimentador secundario, no representaron ninguna ventaja o influyeron en igual medida sobre los resultados observados.

Por lo anterior, se infiere que las diferencias o similitudes en el desempeño del sedimentador secundario dependieron ampliamente de las características de sedimentabilidad del licor mixto.

5.3.1 Características de sedimentabilidad

Las pruebas de sedimentabilidad (VSZ, IVL e IVLD) mostraron que el lodo producido en cada Fase presentó valores dentro del rango establecido como de pobre sedimentabilidad, con una leve tendencia a mejorar con la inclusión de la clarificación primaria en la Fase II. Los valores de IVL presentados en la Figura 5.31, muestran que el licor mixto en el RC se ubicó en un rango predominante entre media y muy pobre sedimentabilidad de acuerdo con la clasificación propuesta por von Sperling (2001), bajo esta misma clasificación el licor mixto del RE presentó mejores características ubicándose en un rango entre media y pobre sedimentabilidad.

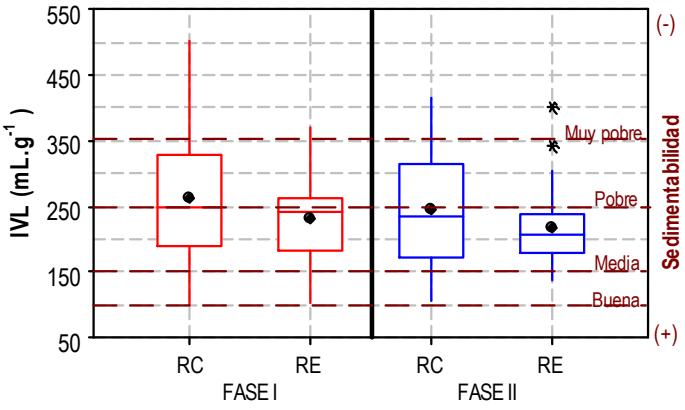
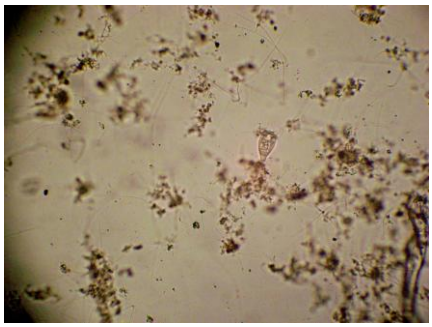


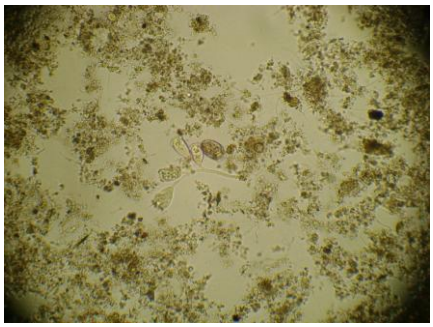
Figura 5.31 Índice Volumétrico de Lodos (IVL)

Las pequeñas diferencias observadas en los valores de IVL en el RC de cada Fase, probablemente fueron causadas por los regímenes de alimentación que se establecieron; en el RC de la Fase I se

fomentó una abundancia de sustrato con la cual se estableció una alta relación A/M, contrario a lo que se observó en la Fase II, donde la relación A/M disminuyó producto de una menor concentración del sustrato afluente. De acuerdo con Sanin et al. (2006) bajo condiciones de exceso de sustrato los microorganismos convierten el exceso en compuestos de almacenamiento similares a las SPE, pero no son liberadas en el medio, al no estar disponible este tipo de sustancias la capacidad de floculación del lodo disminuye creando un floc disperso de menor tamaño, las observaciones en el microscopio revelaron que en el RC de la Fase I se formó un floc biológico de estas características, con muy pocos organismos asociados a él, mientras que en el licor mixto del RC de la Fase II se incrementó la presencia de organismos asociados al floc biológico (ver Figura 5.32), lo que podría haber contribuido para que las propiedades de floculación mejoraran, lo cual físicamente se expresó a través de mejores valores de IVL, sin embargo al comparar los valores promedio de IVL del RC frente a los limites que sugiere la literatura, tal mejoría no fue tan significativa.



(a) Floc disperso y estructura débil, con muy pocos organismo, tímidos y pequeños – RC Fase I



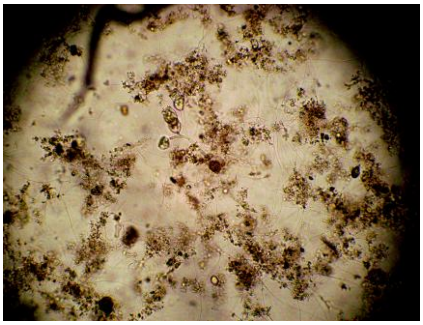
(b) Floc agregado con organismo asociados de tamaño apreciable – RC Fase II

Figura 5.32 Características microscópicas del floc biológico en el RC

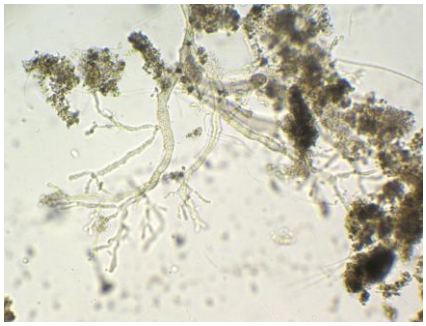
La comparación entre los valores de IVL del RC y RE, mostró que el IVL del licor mixto del RE se ubicó predominantemente en un mejor rango dentro de la clasificación que propone von Sperling (2001), sin llegar en ninguna de las fases a presentar óptimas características de sedimentabilidad. Aspectos como la hidrólisis del sustrato que tiene lugar en el RE, podrían ser responsables de la mejoría en las características de sedimentabilidad, este mecanismo necesario para el aprovechamiento del sustrato particulado, solo es posible a través de la liberación de SPE que permiten el rompimiento de este tipo sustrato, transformándolo en sustrato soluble. La liberación de SPE que expone Eliosov y Argaman (1995) y (Dimock y Morgenroth (2006) es análogo al planteamiento de Sanin et al. (2006) quien indica que cuando se superan las condiciones de exceso de nutrientes, las SPE almacenadas son liberadas al medio mejorando las características de sedimentabilidad del lodo, un fenómeno similar a este puede haber ocurrido en el RE en las dos fases, toda vez que la hidrólisis es el mecanismo predominante en este ambiente, según lo anotan autores como Ramalho (1996) y Sarioglu et al. (2003).

Anteriormente, se indicó que la concentración de SSVLM en la recirculación de lodos fue mayor en la Fase II, debido a una mejor compactación de los sólidos en esta Fase, en ese sentido Jin et al. (2003) relacionaron la capacidad de compresibilidad o compactación del floc con el IVL, aunque

estadísticamente el IVL del licor mixto del RC y RE de cada fase no presentó diferencias significativas, la mejoría en el IVL del licor mixto del RE frente al licor mixto del RC puede estar relacionado con el grado de compactación del lodo secundario. Las observaciones al microscopio revelaron que el floc biológico del RE en las dos fases, presentaba una mejor compactación y una mayor cantidad de organismos asociados a él cuando era comparado con el floc del RC, así como la presencia de zooglea, principalmente en el floc del RE de la Fase II, en la Figura 5.33 se ilustra lo expuesto.



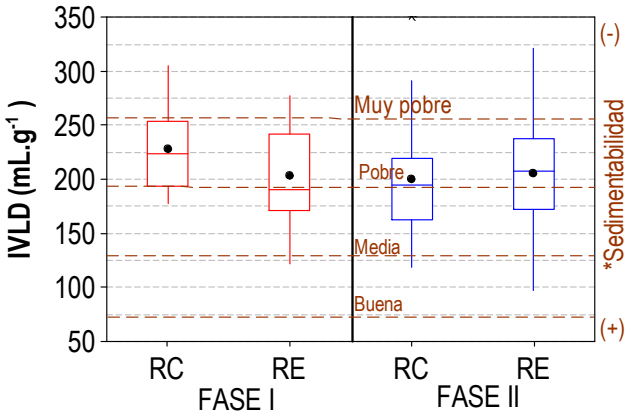
(a) Agregación de floc y presencia de organismos asociados al floc – RE Fase I



(b) Presencia de zooglea (10x) – RE Fase II

Figura 5.33 Características microscópicas del floc biológico en el RE

Eliminando la interferencia que podría generar la concentración de SST, el IVLD ratificó la característica de mala sedimentabilidad del licor mixto formado en el RC, tal como se ilustra en la Figura 5.34, sobre este resultado influyeron además de los aspectos fisiológicos en el RC relacionados con una mayor o menor relación A/M como se expuso anteriormente, la presencia de descargas no controladas de sustancias potencialmente inhibitorias de la actividad microbiológica como detergentes y G/A, influyeron sobre este resultado, especialmente en la promoción de un crecimiento disperso como lo sugieren Gerardi (2002) y Petrovic y Barceló (2004).



*Niveles según limites sugeridos por von Sperling (2001)

Figura 5.34 Índice Volumétrico de Lodos Diluido (IVLD)

Las contantes de Vesilind calculadas para determinar la calidad del lodo secundario, específicamente para el lodo de la purga principal, ratificaron las características de pobre y muy pobre sedimentabilidad con relación a la constante v_o y entre buena y pobre con relación a la constante k, tal como se ilustra en la Figura 5.35. La inclusión de la clarificación primaria promovió una leve mejoría en las características de sedimentabilidad del lodo, sin embrago estadísticamente no hay evidencia suficiente para concluir que el promedio de las constantes v_o y k difieran significativamente de una Fase a otra.

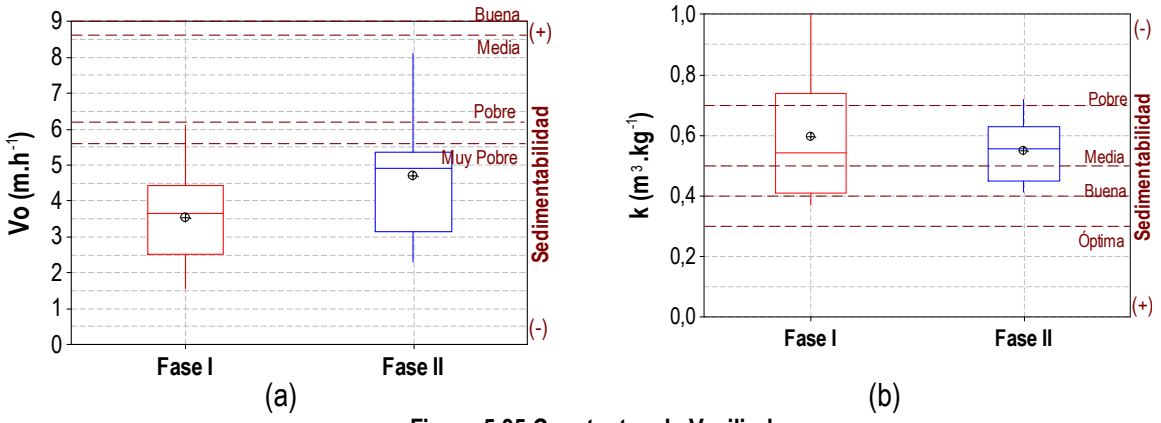


Figura 5.35 Constantes de Vesilind

El IVL y VSZ calificaron al lodo secundario con pobres características de sedimentabilidad según la clasificación que propone von Sperling (2001); este resultado es acorde con lo sugerido por Jin et al. (2003) quienes afirman que un lodo de baja capacidad de compresibilidad o adensamiento, la cual se determina a partir del IVL, generalmente también tiene pobres características de sedimentabilidad definida principalmente a través de VSZ.

Jin et al.(2003) definen la hidrofobicidad, la superficie de carga negativa y la viscosidad del floc biológico como los principales factores que causan las pobres características de sedimentabilidad. Aunque este tipo de parámetros no fueron determinados en esta investigación, se infiere que la presencia de hidróxidos y bicarbonatos de carga negativa, y carbonatos de elementos como calcio, magnesio, potasio, amoniaco y aminas que han sido relacionados con la alcalinidad en el ARD por Jenkins et al. (2001) y Davis y Harshman (1991) podían haber contribuido con el predominio de cargas negativas en el medio; de igual forma la presencia de G/A pudo influir sobre la viscosidad del floc, el efecto de estas sustancias sobre las características de sedimentabilidad y compresibilidad del floc biológico fueron potenciados por la ausencia de la clarificación primaria en la Fase I.

5.3.2 Producción de sólidos

La producción de lodos fue mayor durante la Fase II con un coeficiente (P_X) promedio de 0.49 kg SST. (kg $DQO_{eliminada}$)$^{-1}$ mientras que en la Fase I este valor fue de 0.25 kg SST. (kg $DQO_{eliminada}$)$^{-1}$ tal como se ilustra en la Figura 5.36. Lo anterior indica que cuando se incluyó la clarificación primaria, la producción de lodos se incrementó en un 51% comparada con la Fase I.

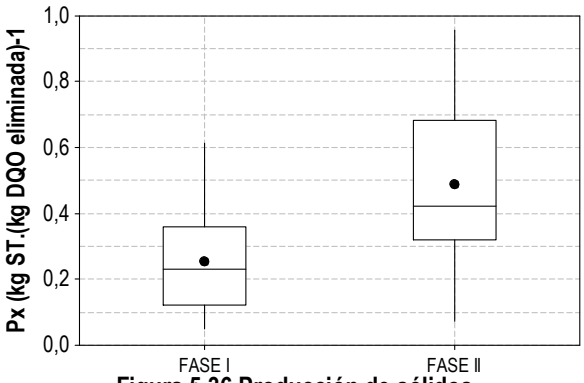


Figura 5.36 Producción de sólidos

Este comportamiento fue contrario a lo esperado, dado que los compuestos particulados cuando no son removidos en el tratamiento primario incrementan la cantidad de lodo secundario producido, según lo indica Loosdrecht et al. (1997) citado por Puigagut et al. (2007). Para el sistema evaluado, este resultado sugirió que durante la Fase II hubo un mejor aprovechamiento del sustrato que se tradujo en un mayor crecimiento microbiano, el cual debió ser controlado a través del incremento del lodo purgado para promover el TRC de 6d.

Por otro lado, la menor producción de lodos durante la Fase I fue debida a la fluctuación en la calidad de los sólidos sedimentados, anteriormente se observó que la recirculación de lodo presentó una menor concentración de SSV en esta fase, este comportamiento se asoció ampliamente con las pobres características de sedimentabilidad del lodo, la alteración de dichas características ocasionó reiteradamente eventos de esponjamiento y flotación de lodo, que generaron una pérdida de biomasa en el sistema, especialmente durante el periodo nocturno en el cual el sistema no era monitoreado, por lo que las purgas de lodo secundario debían ser menores para controlar el TRC, lo que finalmente se tradujo en un coeficiente de producción de lodos menor.

En la Figura 5.37 se ilustra la carga de sólidos producida por cada punto de purga, en ella se observa que la purga principal en la Fase I ocasionó la mayor carga de sólidos, entre 0.73 y 2.20 kg $ST.d^{-1}$, mientras que la carga menor fue debida a la espuma entre 0.09 y 0.55 kg $ST.d^{-1}$, el lodo flotante y la purga secundaria produjeron entre 0.16 y 1.18 kg $ST.d^{-1}$. Durante la Fase II, se observó mayor variación en la carga de sólidos producidos comparados con la Fase I. La purga secundaria ocasionó la mayor carga de sólidos, entre 0.45 y 3.77 kg $ST.d^{-1}$, mientras que carga menor fue debida a la purga principal entre 0.52 y 3.10 kg $ST.d^{-1}$ y el lodo flotante entre 0.32 y 2.18 kg $ST.d^{-1}$

Aspectos como la compactación del lodo pudieron estar relacionados con el comportamiento descrito. Durante la Fase I fue necesario retirar diariamente en promedio 513L de lodo, de los cuales el 50% y 23% se retiraban de los puntos de purga: principal y secundaria respectivamente, mientras que el 27% restante era retirado como lodo de mala calidad a través de las espumas y el material flotante. En la Fase II, el volumen de lodo purgado diariamente se incrementó hasta de un promedio de 665 L, de los cuales el 89% era retirado a través del los puntos de purga principal y secundaria, y el volumen de lodo flotante se redujo al 11%. La distribución porcentual del volumen del lodo de purga sugirió que la mayor compactación que mostró el lodo secundario durante la Fase II, provocó

que el volumen de purga se incrementara para operar el sistema en un TRC cercano al valor operacional establecido como referencia, es decir 6d.

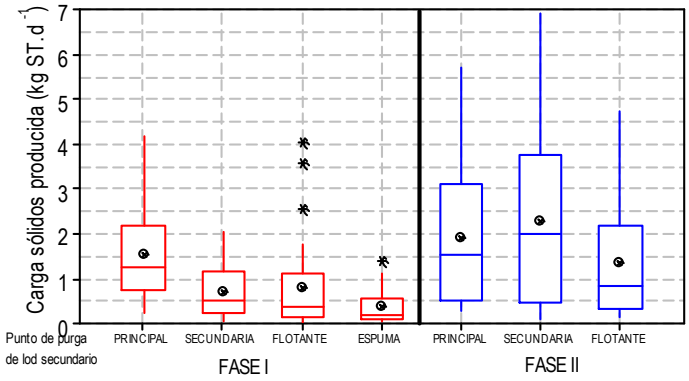


Figura 5.37 Carga de sólidos purgados

En torno a las características de sedimentabilidad del lodo secundario se concluye que la ausencia de la clarificación primaria agravó las condiciones de mala sedimentabilidad, promovidas por la alteración de las propiedades de bio-floculación. De acuerdo con Jin et al.(2003) y Sanin et al. (2006) la capacidad de biofloculación del floc biológico está relacionada con el contenido de SPE, las cuales se incrementan con el aumento del TRC, es decir cuando disminuye la relación A/M. Durante la Fase I la relación A/M fue 60% mayor en comparación con la Fase II, por lo que se infiere que la cantidad de SPE en el RC de la Fase I pudo disminuir en una proporción similar, lo que se expresó físicamente a través de los problemas de separación de sólido – líquido como lodo flotante y esponjamiento, los cuales fueron más agudos en ausencia de la clarificación primaria. A nivel microscópico este fenómeno se relacionó con la ausencia de las bacterias formadoras de floc como la *zooglea*, Jenkins et al. (2004) afirman que los problemas de separación de lodo están ampliamente relacionados con la microestructura del floc biológico, que puede ser alterada por la ausencia de SPE.

5.4 MICROSCOPIA

Los análisis de microscopia indicaron la presencia en el licor mixto de protozoos y metazoos. Entre los protozoos se observó con mayor frecuencia microorganismos que hacen parte del grupo de ciliados fijos (27.3%) seguidos de ciliados libres reptantes (19,3%), mientras que los rotíferos clasificados dentro de los metazoos fueron observados con una frecuencia de 16,9%, tal como se ilustra en la Figura 5.38. La predominancia de protozoos fue tomada como un indicador positivo del desempeño del sistema, ya que estos microorganismos cumplen la función de mantener equilibrada la comunidad de bacterias responsables principalmente de la transformación de la materia orgánica carbonacea.

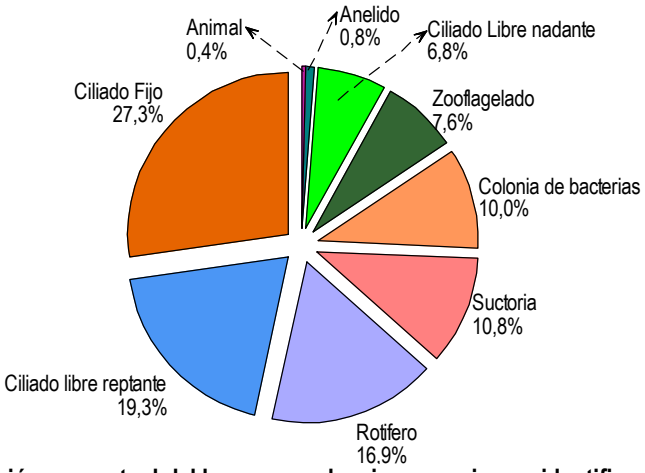
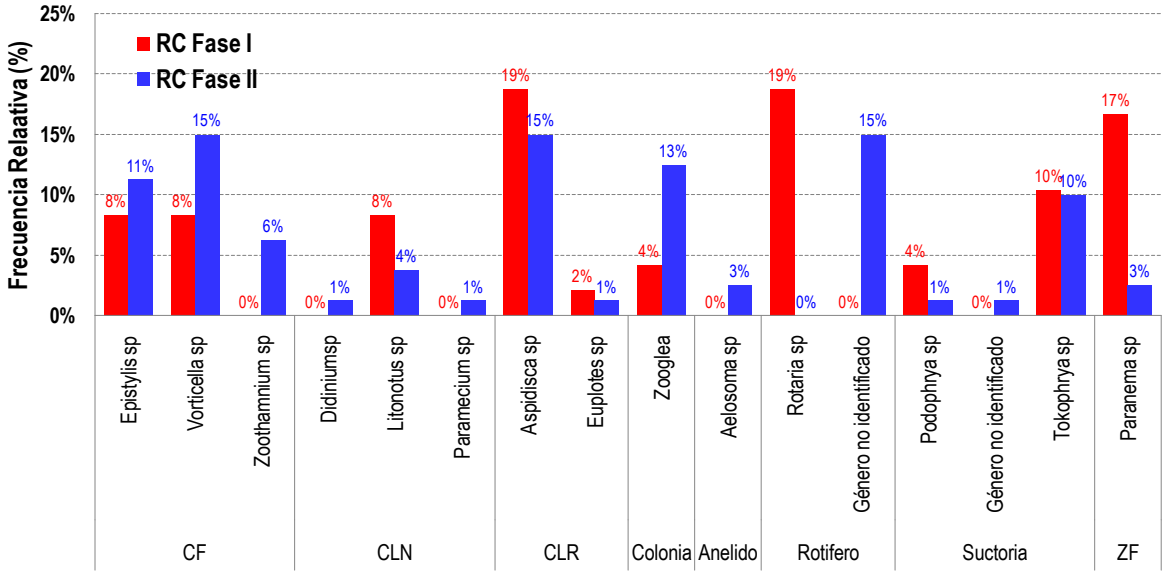


Figura 5.38 Distribución porcentual del los grupos de microorganismos identificados en el licor mixto

En la Figura 5.39 se ilustra la frecuencia relativa con la que fueron observados los diferentes grupos y géneros de microorganismos en el RC. En el licor mixto del RC durante la Fase I fue mayor la presencia de ciliados libres reptantes del género *Aspidisca sp,* Rotiferos del género *Rotaria sp* y Zooflagelados del género *Paranemá sp*, mientras que en la Fase II, la presencia de este tipo de microorganismos disminuyó, dando paso a ciliados fijos del género *Epistylis sp y Vorticella sp* y al incremento del género de rotíferos no identificados y a la presencia de colonias de bacterias como *zooglea*. El incremento en la diversidad de géneros en el SLA ha sido asociada por Madoni (2003) con SLA que operan adecuadamente, este resultado podría indicar que la inclusión de la clarificación primaria condujo rápidamente el sistema hacia un desempeño más estable.



CF: Ciliados Fijos; CLN: Ciliados Libres Nadantes; CLR: Ciliados Libres Reptantes; ZF: Zooflagelados

Figura 5.39 Microorganismos identificados en el Reactor de Contacto

Con relación a la sedimentabilidad, Zhou et al (2006) sugiere que una alta presencia de microorganismos del género *Litonotus sp* es un indicador de condiciones de baja sedimentabilidad del lodo relacionada con altos IVL, mientras que Vilaseca (2001) asocia la presencia de este tipo de microorganismos que se alimentan de pequeños flagelados y ciliados, con condiciones de formación de flóc en sistemas donde no se han establecidos ciliados fijos ó pedunculados, este género de microorganismos fue observado con mayor frecuencia en el licor mixto del RC de la Fase I, lo cual es acorde con lo observado a través del IVL y con el grado de compactación del lodo alcanzado en el en el SS en la Fase I.

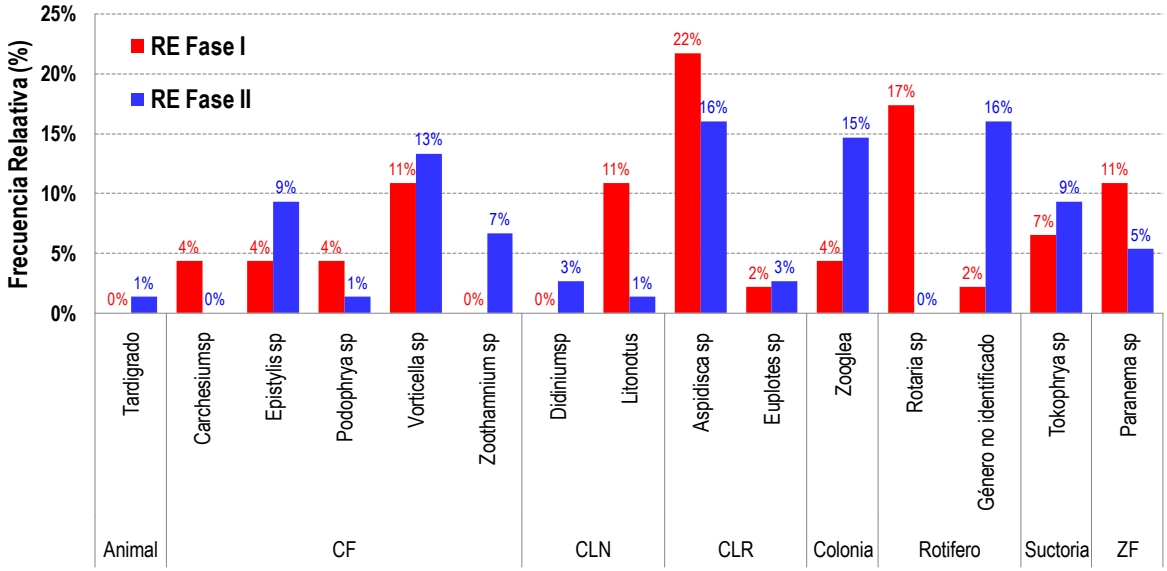
En la Fase sin clarificación primaria se observó un predominio de zooflagelados del género *Paranemá*, de Andrade et al. (2007) anota que este tipo de microorganismos no se agregan al floc biológico y salen en el efluente y Bento et al. (2005) relacionaron este tipo de microorganismo con lodos de densidad elevada y baja condición de sedimentabilidad, la presencia relativa de este tipo de microorganismos fue mayor en el licor mixto del RC de la Fase I, lo cual está en concordancia con lo observado en los ensayos de sedimentabilidad, donde se observó que este licor mixto presentó entre pobre y muy pobre sedimentabilidad.

La presencia de ciliados libres reptantes del género *Aspidisca sp* es interpretada por de Andrade et al. (2007) como una consecuencia del aumento en el número de bacterias que son su fuente de alimentación, provocada por una mayor disponibilidad de nitrógeno, fósforo y MO, la presencia de este tipo de microorganismos fue mayor en la ausencia de la clarificación primaria, demostrando así la respuesta del sistema ante un incrementó en el contenido de MO afluente.

Por otro lado, en la Fase II se incrementó significativamente la presencia de zooglea y rotíferos en el RC; Jenkins et al. (2004) relaciona la presencia de zooglea con procesos de formación y aglomeración de floc biológico, mientras Vilaseca (2001) indica que los rotíferos están presentes en ambientes con una estabilización buena y con OD sobrante, por lo anterior se infiere que la inclusión de la clarificación primaria fomentó un ambiente con mejores condiciones para el desarrollo de la actividad microbiológica, permitiendo una mayor estabilización del sistema.

El incremento de ciliados libres del género *vorticella sp*, indicó que el sistema en la Fase II alcanzó rápidamente las condiciones estables, Vilaseca (2001) sugiere que esta especie puede utilizarse como indicadores aproximados del TRC promedio del sistema en el cual se encuentran, por lo que es posible suponer que el TRC promedio de 5.3 d que se alcanzó en el sistema durante la Fase II fue adecuado para que se estableciera un equilibrio dinámico en la población microbiana.

En la Figura 5.40 se ilustra la frecuencia relativa con la que fueron observados los microorganismos en el RE, en la Fase I fue notable la presencia de ciliados libres reptantes del género *Aspidisca sp* y rotíferos del género *Rotaria sp*. Liu et al. (2008) correlacionan la presencia de ciliados libres reptantes con lodos de baja sedimentabilidad, a través del IVL se encontró que el licor mixto del RE presentaba características de lodo de pobre sedimentabilidad según la clasificación propuesta por von Sperling (2001), por lo que la unión de estos resultados demuestra una correspondencia entre las propiedades físicas y microbiológicas del licor mixto del RE de la Fase I.



CF: Ciliados Fijos; CLN: Ciliados Libres Nadantes; CLR: Ciliados Libres Reptantes; ZF: Zooflagelados

Figura 5.40 Microorganismos identificados en el Reactor de Estabilización

La frecuencia relativa con la que fueron observados zooflagelados del género *Paramecium sp* en el RE de la Fase II disminuyó en comparación con lo observado en el RE de la Fase I, lo cual se relacionó con una mejoría en las propiedades de biofloculación del floc biológico, toda vez que el grupo de zooflagelados ha sido relacionado por Drakides (1978) y Madoni (1986) citado por Madoni (2003) con lodos de baja sedimentabilidad causada por sobrecarga orgánica ó deficiencia en el nivel de aireación.

En el RE de la Fase II, se observó un mayor número de géneros no identificados de rotíferos, de ciliados fijos del género *Epistylis sp*, *Vorticela sp* y de la presencia masiva de colonias de bacterias zooglea, lo que podría ser interpretado como una mayor diversidad sin el predominio de un solo grupo de microorganismo, como ocurrió en el RE de la Fase I. Mayor diversidad de microorganismos es relacionada por Madoni (2003) con SLA que operan normalmente, es decir que existe un balance entre los microorganismos descomponedores de MO como bacterias y predadores de bacterias como protozoos y metazoos.

En general, la microscopia indicó que el licor mixto del RC y RE de cada fase difieren en la diversidad de géneros, el paso del licor mixto desde el RC hacia el RE tuvo un efecto sobre la diversidad de géneros de microorganismos, siendo mayor en el RE, favoreciendo la presencia de ciliados fijos y disminuyendo la presencia de ciliados libres nadantes, este comportamiento se asoció con mejores condiciones ambientales causadas por la disminución de los efectos adversos que puedan estar relacionados con las variaciones en la calidad de AR afluente.

La microscopia como herramienta para establecer las condiciones de estabilidad y desempeñó del sistema, describió correctamente la calidad del lodo formado, especialmente aquellas características

que se relacionaron con la sedimentabilidad y compactación de lodo, así mismo fue una herramienta útil para advertir la presencia de sustancias o condiciones desfavorables para la actividad microbiológica, la cual se manifestó a través del incremento o disminución de la presencia relativa de ciertos microorganismos, así como de la forma y apariencia del floc biológico.

6 CONCLUSIONES

La calidad del ARd presentó una tendencia a ubicarse dentro de los valores bajos de concentración reportados en estudios anteriores por EMCALI-UNIVALLE (2007), EMCALI-UNIVALLE (2008) y Vásquez et al. (2011). A excepción de la alcalinidad total, no se observaron diferencias significativas entre la composición del ARd de la Fase I y ARd de la Fase II, lo que incrementó la posibilidad de comparar el desempeño de los sistemas al eliminar la calidad del ARd como una fuente de interferencia en los resultados obtenidos.

El ARd afluente al RC en la Fase I presentó características de ARD entre media y débil concentración, mientras que el EP en la Fase II correspondió a un ARD de débil concentración, de acuerdo con los límites establecidos por Metcalf y Eddy (2003). La composición promedio de estos afluentes en términos de la DQO, DBO_5 y SST presentó diferencias en un nivel de significancia de 0.05, tal diferencia respondió al comportamiento esperado, dada la inclusión de la clarificación primaria en la Fase II.

Eliminar la clarificación primaria en la Fase I incrementó en un 32% la MO biodegradable afluente al RC, sin embargo el sistema no tradujo este incrementó de sustrato en una mayor cantidad de biomasa, probablemente el TRH en el RE no fue suficiente para que el proceso de hidrólisis de este tipo de sustrato tuviese lugar en esta unidad, ya que su tamaño (mayor al sustrato particulado) lo hace de difícil degradación por lo que podría requerir un tiempo mayor para ser estabilizado.

La clarificación primaria en la Fase II, además de reducir el contenido de DQO, DBO_5 y SST también tuvo un efecto benéfico sobre la estabilidad del sistema biológico, ya que preservó las características de biosorción del floc biológico y mejoró las propiedades de bioflocculación del lodo secundario, siendo esta una de las principales diferencias en el desempeño de los sistemas evaluados, que se derivó de la función homogenizadora que desempeñó la clarificación primaria.

En la Fase II la clarificación primaria desempeñó una función amortiguadora y homogenizadora de la calidad de afluente al RC. En la Fase I, la ausencia de estas funciones ó barrera de control fue parcialmente suministrada por la distribución de sólidos en el sistema, ya que menos del 20% de la biomasa activa concentrada en el RC estuvo expuesta a los efectos resultantes de las variaciones en la calidad del ARd.

Las concentraciones de DQO, DBO_5 y SST en el ES de la Fase I y II fueron 54, 36 y 18 $mg.L^{-1}$ para la primera y 42, 26 y 20 $mg.L^{-1}$ en la segunda; la similitud en la calidad del ES de las dos Fases resultó posiblemente de un adecuado desempeño de los mecanismos de adsorción y entrampamiento de la MO soluble y particulada, así como de la capacidad de floc biológico para atrapar el material particulado orgánico e inorgánico. Este resultado también permitió concluir que el SLAEC mostró un gran aprovechamiento del sustrato, aún cuando la carga orgánica aplicada medida a través de la relación A/M y COV en la Fase I, fue superior a los límites recomendados en la literatura para este sistema.

En torno a las características de sedimentabilidad del lodo secundario, la ausencia de la clarificación primaria agravó su característica de mala sedimentabilidad, promovida por la alteración de las propiedades de biofloculación, las cuales se refieren con la microestructura del floc biológico, a nivel microscópico esta condición se relacionó con la ausencia de bacterias formadoras de floc como la zooglea y físicamente se expresó a través de la presencia de lodo flotante y eventos reiterados de esponjamiento del lodo secundario. El ingreso de sustancias potencialmente inhibitorias de la actividad microbiana como G/A y detergentes durante la Fase I, se relacionó con la disminución de las propiedades de biofloculación del floc.

La observación microscopia del licor mixto permitió inferir que la inclusión de la clarificación primaria propició un ambiente más favorable para el desarrollo de consorcios microbianos y aglomeración del floc biológico, el cual se manifestó físicamente a través de una mejor compactación del lodo secundario, cuantitativamente se midió a través de una mayor concentración de SSV en el lodo recirculado desde el sedimentador secundario hacia el RE y un mejoramiento relativo en las características de sedimentabilidad del lodo, determinadas a través del IVL y VSZ.

Eliminar la clarificación primaria del ARd no representó una pérdida significativa de la calidad del ES, lo cual resulta ventajoso cuando se observa desde una perspectiva de costo-eficiencia ya que con un menor número de etapas de tratamiento para una misma calidad de AR se alcanzó un ES de características similares. Sin embargo, se requieren estrategia, a nivel de operación ó diseño del sedimentador secundario de tal forma que esta unidad sea capaz de compactar un lodo con muy baja sedimentabilidad, ya que en ausencia de una barrera de control como la clarificación primaria que evita el ingreso de sustancias como surfactantes y G/A, esta característica del lodo secundario es alterada, siendo esta la principal diferencia observada en desempeño del SLAEC sin clarificación primaria.

7 BIBLIOGRAFÍA

AL-MUTAIRI, N. Z., AL-SHARIFI, F. A. y AL-SHAMMARI, S. B. 2008. Evaluation study of a slaughterhouse wastewater treatment plant including contact-assisted activated sludge and DAF. *Desalination,* 225**,** 167-175.

AL-MUTAIRI, N. Z., HAMODA, M. F. y AL-GHUSAIN, I. A. 2003. Performance-based characterization of a contact stabilization process for slaughterhouse wastewater. *Journal of environmental science and health. Part A.- Toxic / Hazardous Substances & Environmental Engineering,* A38**,** 2287-2300.

AL-SA'ED, R. y ZIMMO, O. 2004. Process performance evaluation of the contact stabilization system at Birzeit University. *International Journal of Environment and Pollution,* 21**,** 511-517.

ALEXANDER, W. V., EKAMA, G. A. y MARAIS, G. R. 1980. The Activated Sludge Process Part 2. Application of the General Kinetic Model to the Contact Stabilization Process. *Water Research,* 14.

APHA, AWWA y WEF 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater,* Washington, DC, American Public Health Association.

BENEFIELD, L. D. y RANDALL, C. W. 1976. Design Procedure for a Contact Stabilization Activated Sludge Process. *Journal (Water Pollution Control Federation),* 48**,** 147-152.

BENEFIELD, L. D. y RANDALL, C. W. 1981. Biological process design for wastewater treatment. *Prentice Hall Series in Environmental Sciences*.

BENTO, A., SEZERINO, P., PHILIPPI, L., REGINATTO, V. y LAPOLLI, F. 2005. Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo. *Engenharia sanitária e ambiental,* 10**,** 329.

BOLZONELLA, D., PAVAN, P., BATTISTONI, P. y CECCHI, F. 2005. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry,* 40**,** 1453-1460.

BOO, O. C. y AGUILAR, S. 1998. A knowledge base for wastewater treatment plants: The case of an activated-sludge facility. *Expert Systems with Applications,* 14**,** 53-61.

CARCELLER, J. M. 1998. Los fenómenos del" bulking" y "foaming" en las estaciones depuradoras de aguas residuales. *Tecnología del agua,* 179.

COPPEN, J. 2004. *Advanced wastewater treatment systems.* Bachelor of Engineering, University of Southern Queensland.

CORDI, L., ASSALIN, M., DIEZ, M. y DURAN, N. 2008. Montagem, partida e operação de um Sistema de Lodos Ativados para o tratamento de Efluentes: parâmetros físico-químicos e biológicos. *Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, SP,* 5**,** 97-115.

CHUDOBA, J. y TUCEK, F. 1985. Production, degradation, and composition of activated sludge in aeration systems without primary sedimentation. *Journal (Water Pollution Control Federation)***,** 201-206.

DAVIS, H. F. y HARSHMAN, J. P. 1991. Aerobic wastewater treatment with alkalinity control. Google Patents.

DE ANDRADE, C., DE CARVALHO, J., MARTINS, M. y BAETA, B. 2007. Monitoramento da microfauna de lodos ativados como suporte operacional no tratamento de efluentes de indústrias têxteis. *24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.* Belo Horizonte/MG: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

DIMOCK, R. y MORGENROTH, E. 2006. The influence of particle size on microbial hydrolysis of protein particles in activated sludge. *Water Research,* 40**,** 2064-2074.

DROSTE, R. L. 1997. *Theory and practice of water and wastewater treatment*, Wiley New York etc.

DULEKGURGEN, E., DOGRUEL, S., KARAHAN, O. y ORHON, D. 2006. Size distribution of wastewater COD fractions as an index for biodegradability. *Water Research,* 40**,** 273-282.

ECKENFELDER, W. 1986. *Wastewater treatment process*. Univ, Vanderbilt (US) patent application.

ECKENFELDER, W. W. 1990. Estimating oxygen requirements and waste sludge from activated sludge with and without primary clarifiers treating municipal wastewater. *Environmental Technology,* 11**,** 793-798.

ELIOSOV, B. y ARGAMAN, Y. 1995. Hydrolysis of particulate organics in activated sludge systems. *Water Research,* 29**,** 155-163.

EMCALI-UNIVALLE 2006. Estudio de evaluación para el tratamiento del efluente de la PTAR Cañaveralejo a través de dos opciones secundarias convencionales. Informe final Fase I. Santiago de Cali. Colombia: EMCALI EICE ESP - Universidad del Valle.

EMCALI-UNIVALLE 2007. Tratamiento secundario del efluente de la PTAR-Cañaveralejo: Estudio y Evaluación de dos opciones a escala piloto. Informe final Fase II. Santiago de Cali. Colombia: EMCALI EICE ESP - Universidad del Valle.

EMCALI-UNIVALLE 2008. Tratamiento secundario del efluente de la PTAR-Cañaveralejo. Evaluación preliminar de una nueva configuración de lodos activados para reducción de costos y mejoramiento de eficiencia. "Definición de parámetros de diseño para la modalidad de estabilización por contacto". Informe Final Fase III. Santiago de Cali. Colombia: EMCALI EICE ESP - Universidad del Valle.

EMCALI 2006. Documentos oficiales del proyecto en desarrollo para el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos para la Ciudad de Cali. *In:* CALI, E. M. D. (ed.). Santiago de Cali, Colombia: Gerencia de Acueducto y Alcantarillado.

FIGUEROA, L. y QUINTERO, A. 1994. *Evaluación de la eficiencia de remociónde carga orgánica con respecto al tiempo de retención en la planta piloto de tratamiento aeróbico de las aguas residuales de la Ciudad de Cali.* Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle.

FORSTER, C. F. y FOUNDATION, W. E. R. 2003. *Wastewater treatment and technology*, Thomas Telford.

FRØLUND, B., PALMGREN, R., KEIDING, K. y NIELSEN, P. H. 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. *Water Research,* 30**,** 1749-1758.

FUCHS, A. y STAUDINGER, G. 1999. Characterising the clarification of the supernatant of activated sludges. *Water Research,* 33**,** 2527-2534.

GARNIER, C., GÖRNER, T., LARTIGES, B. S., ABDELOUHAB, S. y DE DONATO, P. 2005. Characterization of activated sludge exopolymers from various origins: a combined size-exclusion chromatography and infrared microscopy study. *Water research,* 39**,** 3044-3044.

GERARDI, M. 2002. *Settleability problems and loss of solids in the activated sludge process*, John Wiley and Sons.

GHANIZADEH, G. y SARRAFPOUR, R. 2001. The effects of temperature and pH on settlability of activated sludge flocs. *Iranian J. Publ. Health,* 30**,** 139-142.

GINESTET, P., MAISONNIER, A. y SPERANDIO, M. 2002. Wastewater COD characterization: biodegradability of physico-chemical fractions. *Water Science & Technology,* 45**,** 89-97.

GIOKAS, D. L., DAIGGER, G. T., SPERLING, M. V., KIM, Y. y PARASKEVAS, P. A. 2003. Comparison and evaluation of empirical zone settling velocity parameters based on sludge volume index using a unified settling characteristics database. *Water Research,* 37**,** 3821-3836.

GRADY, C., DAIGGER, G. y LIM, H. 1999. *Biological wastewater treatment,* New York, Ed. Marcel Dekker

GRICH, E. R. 1961. Operating Experience with Activated Sludge Reaeration. *Journal (Water Pollution Control Federation),* 33**,** 856-863.

GUELLIL, A., THOMAS, F., BLOCK, J. C., BERSILLON, J. L. y GINESTET, P. 2001. Transfer of organic matter between wastewater and activated sludge flocs. *Water Research,* 35**,** 143-150.

GUJER, W. y JENKINS, D. 1975a. The Contact Stabilization Activated Sludge Process? Oxygen Utilization, Sludge Production and Efficiency. *Water Research,* 9**,** 553.

GUJER, W. y JENKINS, D. 1975b. A nitrification model for the contact stabilization activated sludge process. *Water Research,* 9**,** 561-566.

HASELTINE, T. R. 1961. Sludge Reaeration in the Activated Sludge Process: A Survey. *Journal (Water Pollution Control Federation)***,** 946-967.

ICHINARI, T., OHTSUBO, A., OZAWA, T., HASEGAWA, K., TEDUKA, K., OGUCHI, T. y KISO, Y. 2008. Wastewater treatment performance and sludge reduction properties of a household wastewater treatment system combined with an aerobic sludge digestion unit. *Process Biochemistry,* 43**,** 722-728.

JENKINS, D., RICHARD, M. y DAIGGER, G. 2004. *Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems*, IWA publishing.

JIN, B., WILÉN, B. y LANT, P. 2003. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge. *Chemical Engineering Journal,* 95**,** 221-234.

JORDÃO, E. y PESSÔA, C. 2005. *Tratamento de esgotos domésticos,* Brasil, Ed. do Autor.

KHARARJIAN, H. A. y SHERRARD, J. H. 1978. Contact Stabilization Treatment of a Colloidal Organic Wastewater. *Journal (Water Pollution Control Federation),* 50**,** 645-652.

KRAUS, L. S. 1955. Dual Aeration as a Rugged Activated Sludge Process. *Sewage and Industrial Wastes,* 27**,** 1347-1355.

LEE, N. y WELANDER, T. 1996. Reducing sludge production in aerobic wastewater treatment through manipulation of the ecosystem. *Water Research,* 30**,** 1781-1790.

LEE, W., KANG, S. y SHIN, H. 2003. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science,* 216**,** 217-227.

LESTER, J. N. y BIRKETT, J. W. 1999. *Microbiology and chemistry for environmental scientists and engineers*, Taylor & Francis.

LIU, J., YANG, M., QI, R., AN, W. y ZHOU, J. 2008. Comparative study of protozoan communities in full-scale MWTPs in Beijing related to treatment processes. *Water Research,* 42**,** 1907-1918.

LIU, S., NI, B., WEL, L., TANG, Y. y YU, H. 2009. Contact-Adsorption-Regeneration-Stabilization Process for the Treatment of Municipal Wastewater. *Journal of Water and Environment Technology,* 7**,** 83-90.

MADONI, P. 2003. Protozoa as indicators of wastewater treatment ef ciency. *Handbook of water and wastewater microbiology***,** 361.

MAHMOOD, T. y ELLIOTT, A. 2006. A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry. *Water Research,* 40**,** 2093-2112.

MALDONADO , V. 2004. Sedimentación. *Cánepa de Vargas, Lidia; Barrenechea Martel, Ada; Aurazo de Zumaeta, Margarita. CEPIS; OPS. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: teoría,* 2.

MARDANI, S., MIRBAGHERI, A., AMIN, M. y GHASEMIAN, M. 2011. Determination of biokinetic coefficients for activated sludge processes on municipal wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering,* 8**,** 83 - 92.

MARTINS, A., HEIJNEN, J. y LOOSDRECHT, M. 2003. Effect of dissolved oxygen concentration on sludge settleability. *Applied microbiology and biotechnology,* 62**,** 586-593.

MÉNDEZ, C. 1991. *Metodología de la Investigación,* México.

MENDONÇA, S. 1999. Lagunas de estabilización. *Organización Panamericana de la Salud (OPS-OMS). Bogotá, Colombia*.

METCALF, L. y EDDY, H. 2003. *Wastewater engineering: treatment and reuse,* New York, NY, Inc.-McGraw-Hill.

MIKKELSEN, L. y KEIDING, K. 2002. Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering. *Water Research,* 36**,** 2451-2462.

MINSALUD 1984. Decreto No. 1594 (del 26 junio de 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la ley 09 de 1979, y el Capítulo II del Título VI- parte III -Libro II y el Título III de la parte III - Libro I del decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

MORGOUN, S. 2007. *Method and plant for biological treatment of aqueous effluents for purification thereof*. France patent application 10/500,844.

MOSCOSO, M. y EGOCHEAGA, L. 2004. Una estrategia para la gestión de las aguas residuales domésticas: haciendo más sostenible la protección de la salud en América Latina y otras regiones en desarrollo. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS).

NYSERDA 2005. Full-scale demonstration of selector-contact stabilization process at town of Rosendale wastewater treatment plant, Ulster County, New York - Final Report. NYSERDA, New York State Energy Research and Development Authority.

OERTHER, D., DE LOS REYES III, F., DE LOS REYES, M. y RASKIN, L. 2001. Quantifying filamentous microorganisms in activated sludge before, during, and after an incident of foaming by oligonucleotide probe hybridizations and antibody staining. *Water Research,* 35**,** 3325-3336.

OKUTMAN, D., ÖVEZ, S. y ORHON, D. 2001. Hydrolysis of settleable substrate in domestic sewage. *Biotechnology Letters,* 23**,** 1907-1914.

ORHON, D., BENEFIELD, L. D. y RANDALL, C. W. 1977. Design Procedure for a Contact Stabilization Activated Sludge Process [with Response]. *Journal (Water Pollution Control Federation),* 49**,** 865-872.

ORHON, D., KARAHAN, Ö. y SÖZEN, S. 1999. The effect of residual microbial products on the experimental assessment of the particulate inert COD in wastewaters. *Water Research,* 33**,** 3191-3203.

OROZCO, A. 2003. *Bioingeniería de Aguas Residuales: Teoría y Diseño,* Bogotá, ACODAL.

OROZCO, Á. y SALAZAR, Á. 1987. *Tratamiento biológico de las aguas residuales,* Medellin.

PÉRTEGA, S. y PITA, S. 2001. Representación gráfica en el análisis de datos. *Cad Aten Primaria,* 8**,** 112-117.
PETROVIC, M. y BARCELÓ, D. 2004. Fate and Removal Surfactants and Related Compounds in Wastewaters and Sludges. *Handbook of environmental chemistry***,** 1-28.
PUIG, S., VAN LOOSDRECHT, M., FLAMELING, A., COLPRIM, J. y MEIJER, S. 2010. The effect of primary sedimentation on full-scale WWTP nutrient removal performance. *Water Research,* 44**,** 3375-3384.
PUIGAGUT, J., SALVADÓ, H., TARRATS, X. y GARCÍA, J. 2007. Effects of particulate and soluble substrates on microfauna populations and treatment efficiency in activated sludge systems. *Water Research,* 41**,** 3168-3176.
PUJOL, R. y CANLER, J. 1992. Biosorption and dynamics of bacterial populations in activated sludge. *Water Research,* 26**,** 209-212.
RAMALHO, R., BELTRÁN, D. y DE LORA, F. 1996. *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté.
RAMALHO, R. S. 1996. *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté.
REARDON, R. 2005. Clarification concepts for treating peak wet weather wastewater flows. *Proceedings of the Water Environment Federation,* 2005**,** 4431-4444.
RENKO, E. 1998. Modelling hindered batch settling Part I: A model for linking zone settling velocity and stirred sludge volume index. *Water SA,* 24**,** 325-330.
RITTMAN, B. E. y MCCARTY, P. L. 2001. *Biotecnología del medio ambiente: Principios y aplicaciones,* Madrid, McGraw-Hill.
ROMERO, J. 2000. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principio de diseño.,* Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería.
ROSINSKI, K. 2001. *Effects of primary treatment optimization on energy savings and recovery in conventional activated sludge process.*
SANIN, F., VATANSEVER, A., TURTIN, I., KARA, F., DURMAZ, B. y SESAY, M. 2006. Operational conditions of activated sludge: Influence on flocculation and dewaterability. *Drying Technology,* 24**,** 1297-1306.
SARIOGLU, M., ORHON, D., GÖRGÜN, E. y ARTAN, N. 2003. Design procedure for carbon removal in contact stabilization activated sludge process. *Water Science and Technology,* 48**,** 285-292.
SCHULTZ, J. R., HEGG, B. A. y RAKNESS, K. L. 1982. Realistic sludge production for activated sludge plants without primary clarifiers. *Journal (Water Pollution Control Federation)***,** 1355-1360.
SHENG, G., YU, H. y LI, X. 2008. Stability of sludge flocs under shear conditions. *Biochemical Engineering Journal,* 38**,** 302-308.
SIDDIQI, R., SPEECE, R. y ENGELBRECHT, R. 1967. Effect of the Stabilization Period on the Performance of the Contact Stabilization Process. *Journal (Water Pollution Control Federation),* 39**,** 1211-1222.
SSPD 2009. Informe Anual de Servicios Públicos en Colombia 2008. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Bogota.
SUTHERLAND, I. 2001. Exopolysaccharides in biofilms, flocs and related structures. *Water Science and Technology,* 43**,** 77-86.
SYKES, R. 1995. Biological Water Treatment Processes. *In:* CHEN, W. y LIEW, J. (eds.) *The civil engineering handbook.* The Ohio State University: CRC Press.

TAN, K. N. y CHUA, H. 1997. COD adsorption capacity of the activated sludge — Its determination and application in the activated sludge process. *Environmental Monitoring and Assessment,* 44**,** 211-217.

TEBBUTT, T. 1979. Primary sedimentation of wastewater. *Journal (Water Pollution Control Federation)***,** 2858-2867.

ULLRICH, A. H. y SMITH, M. W. 1951. The biosorption process of sewage and waste treatment. *Sewage and Industrial Wastes***,** 1248-1253.

ULLRICH, A. H. y SMITH, M. W. 1957. Operation Experience with Activated Sludge: Biosorption at Austin, Texas. *Sewage and Industrial Wastes,* 29**,** 400-413.

VAN HAANDEL, A. 1992. Activated sludge settling part II: Settling theory and application to design and optimisation. *Water S. A.,* 18**,** 173-180.

VAN HAANDEL, A. y MARAIS, G. 1999. *O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operação; The behavior of the system of activated silt: theory and applications for projects and operation,* Campina Grande - PB.

VAN HAANDEL, A. y VAN DER LUBBE, J. 2007. *Handbook Biological Waste Water Treatment - Design and Optimisation of Activated Sludge System,* Brazil, Leidschendam: Quist.

VANDERHASSELT, A., ASPEGREN, H., VANROLLEGHEM, P. y VERSTRAETE, W. 1999. Settling characterization using on-line sensors at a full-scale wastewater treatment plant. *WATER SA,* 25**,** 453-458.

VASQUEZ , N. 2009. *Evaluación a escala piloto del sistema de lodos activados en las modalidades de estabilización por contacto y convencional como alternativa de tratamiento secundario para el agua residual doméstica de la ciudad de Cali.* Master, Universidad del Valle.

VÁSQUEZ, N., RODRIGUEZ, J., TORRES, P. y MADERA, C. 2011. Performance of a Contact Stabilization Process for Domestic Wastewater Treatment of Cali, Colombia. *Revista Dyna,* IN PRESS.

VAZOLLÉR, R., GARCÍA, M., GARCIA, A., CONCEIÇAO, J. y DE SANEAMENTO AMBIENTAL, C. 1989. Microbiologia de lodos ativados. *CETESB Série Manuais*.

VESILIND, P. 2003. *Wastewater treatment plant design*, Intl Water Assn.

VILASECA, M. M. 2001. Observación microscópica de fangos activados en los tratamientos de depuración biológica. *Boletín INTEXTER.* 119 ed. España: Universidad Politecnica de Cataluña.

VON SPERLING, M. 1996. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, Universidade Federal de Minas Gerais.

VON SPERLING, M. 2001. Dimensionamento de lodos ativados por batelada utilizando os princípios da teoria do fluxo de sólidos. *Engenharia sanitária e ambiental,* 6**,** 147-156.

VON SPERLING, M. 2007. *Wastewater characteristics, treatment and disposal,* Londres, IWA Publishing.

VON SPERLING, M. y CHERNICHARO, C. A. L. 2005. *Biological wastewater treatment in warm climate regions*, IWA.

WAHLBERG, E. 2004. Activated sludge process optimization. Google Patents.

WEF 2005. *Clarifier Design: WEF Manual of Practice No. FD-8. Water Environment Federation*, McGraw-Hill Professional.

WEI, Y., VAN HOUTEN, R. T., BORGER, A. R., EIKELBOOM, D. H. y FAN, Y. 2003. Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment. *Water Research,* 37**,** 4453-4467.

WESTON, R. F. 1961. Design of Sludge Reaeration Activated Sludge Systems. *Journal (Water Pollution Control Federation),* 33**,** 748-757.

WILÉN, B., LUMLEY, D., MATTSSON, A. y MINO, T. 2008. Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant. *Water Research,* 42**,** 4404-4418.

WINKLER, M., ENG, C. y CHEM, M. 1998. *Tratamiento biológico de aguas de desecho,* México.

XU, G. y QIAN, C. 2007. Wastewater chemically enhanced primary treatment combined with adsorption of activated sludge: AS-CEPT in wastewater treatment. *Moving Forward: wastewater biosolids sustainability: Technical, Managerial and Public Synergy.* Moncton, Canada: ILA International Water Association.

YU, G. H., HE, P. J., SHAO, L. M. y LEE, D. J. 2007. Enzyme activities in activated sludge flocs. *Applied microbiology and biotechnology,* 77**,** 605-612.

ZHANG, P., CHEN, Y., HUANG, T.-Y. y ZHOU, Q. 2009a. Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation in the presence of SDBS in semi-continuous flow reactors: Effect of solids retention time and temperature. *Chemical Engineering Journal,* 148**,** 348-353.

ZHANG, W., ZOU, Z. y SUI, J. 2009b. Study on Settlement Velocity of Activated Sludge. *IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering* [Online].

ZHOU, K., XU, M., DAI, J. y CAO, H. 2006. The microfauna communities and operational monitoring of an activated sludge plant in China. *European Journal of Protistology,* 42**,** 291-295.

8 ANEXOS

8.1 DATOS DE CAMPO

8.1.1 Muestreo horario

Anexo 8.1. 1 Variables Fisicoquímicas del ARd – muestreo horario

Muestreo	Hora	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
Muestreo 1	8	6,37	123	204	72
Muestreo 1	10	6,39	163	183	
Muestreo 1	12	6,32	225	188	104
Muestreo 1	14	6,57	157	303	116
Muestreo 1	16	6,39	150	345	126
Muestreo 1	18	6,41	159	275	130
Muestreo 1	20	6,86	150	282	118
Muestreo 1	22	6,64	163	273	140
Muestreo 1	24	6,42	97	237	104
Muestreo 1	2	6,4	134	249	102
Muestreo 1	4	6,7	170	178	90
Muestreo 1	6	6,7	173	120	64
Muestreo 1	8	6,74	148	129	84
Muestreo 2	10	6,53	125	162	64
Muestreo 2	12	6,41	137	454	110
Muestreo 2	14	6,8	261	242	116
Muestreo 2	16	6,45	124	364	108
Muestreo 2	18	6,58	116	268	114
Muestreo 2	20	6,56	120	329	102
Muestreo 2	22	7,03	114	315	124
Muestreo 2	24	6,66	118	247	34
Muestreo 2	2	6,6	122	287	116
Muestreo 2	4	6,59	112	204	102
Muestreo 2	6	6,8	129	176	96
Muestreo 2	8	6,91	112	49	68
Muestreo 2	10	6,44	122	148	62
Muestreo 3	10	6,76	116	263	140
Muestreo 3	12	6,62	113	140	136
Muestreo 3	14	6,68	174	430	133
Muestreo 3	16	6,85	174	480	148
Muestreo 3	18	6,79	184	380	150
Muestreo 3	20	6,56	138	373	102
Muestreo 3	22	6,69	153	407	140
Muestreo 3	24	6,91	202	333	120
Muestreo 3	2	6,66	214	260	100
Muestreo 3	4	6,8	205	177	80
Muestreo 3	6	6,93	177	160	50
Muestreo 3	8	6,91	171	170	96
Muestreo 4	8	6,18	118		78
Muestreo 4	10	6,36	124	407	95

Muestreo	Hora	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
Muestreo 4	12	6,62	152	287	138
Muestreo 4	14	6,61	141	280	104
Muestreo 4	16	6,28	120	393	136
Muestreo 4	18	6,4	120	327	138
Muestreo 4	20	6,7	129	310	108
Muestreo 4	22	6,74	135	305	88
Muestreo 4	24	6,47	129	256	94
Muestreo 4	2	6,3	122	313	92
Muestreo 4	4	6,81	152	367	98
Muestreo 4	8	6,2	93	284	96

Anexo 8.1. 2 Variables Fisicoquímicas del EP - muestreo horario

Muestreo	Hora	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
Muestreo 4	8	6,08	97	341	
Muestreo 4	10	6,45	112	150	94
Muestreo 4	12	6,43	135	181	56
Muestreo 4	14	6,46	145	226	86
Muestreo 4	16	6,49	102	254	92
Muestreo 4	18	6,33	125	270	64
Muestreo 4	20	6,57	103	294	92
Muestreo 4	22	6,62	127	261	84
Muestreo 4	24	6,43	109	284	78
Muestreo 4	2	6,24	122	214	66
Muestreo 4	4	6,38	122	242	
Muestreo 4	8	5,96	91	228	70

8.1.2 Muestreo puntual

Anexo 8.1. 3 Variables fisicoquímicas del ARd Fase I - muestreo puntual

ARd - Fase I						
Día de Operación	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO $_T$ ($mg.L^{-1}$)	DQO $_F$ ($mg.L^{-1}$)	DBO_5 $_T$ ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
4			143			60
5			143			40
6			143			144
8	6,52	142	180			126
9			180		110	130
11	6,13	157	190			90
19	6,6	199	190			96
20	6,36	152	190			82
21	6,21	152	230		180	74
22			150			74
23	6,78	181	150			104
24	6,43		150			104
25	6,25	209	150			88
26	6,65	206	283		180	128
27	6,84	204	213			72
28	6,42		246			56
29	6,37	170	246			114
30	6,43	170	423			72
31			430			134
32	6,54	152	353			
33			353			104
36			583		410	
37	6,39	195	286		270	118
38			286			66
39			286			52
48	6,59	217	260		125	
50	6,14		290			84
51	6,42	175	350		210	130
52	6,41	186	350			136
53	6,33	188	293			136
54	6,75	212	293			92
55	6,3	168	336		190	116
56	6,35	163	353		200	126
58	6,44	173	353			116
71	6,18	148	322		300	150
72			242			132
76	6,52	166	70			130
80			280			62
81			280			46
83	6,61	150	280			
84	6,49	143	280			144
85	6,37	123	204		150	134
86	6,74	148	129	115	110	92
87			148	61		84

ARd - Fase I						
Día de Operación	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO $_T$ ($mg.L^{-1}$)	DQO $_F$ ($mg.L^{-1}$)	$DBO_{5\ T}$ ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
88	6,36	132	157	91	120	80
91			216	124		98
92	6,67	232	216	124		112
93	6,47	163	249	124	235	112
94			249	124		66
106			117	108		66
107			176	153	240	90
108	6,43	151	190	113	240	104
109	6,58	120	207	120		108
110	6,84	127	202	148		78
111			294	178		86
112			202	134	135	104
113			202	134		104
114			148	110		98

Anexo 8.1. 4 Variables Fisicoquímicas del ARd Fase II - muestreo puntual

ARd - Fase II						
Día de Operación	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO $_T$ ($mg.L^{-1}$)	DQO $_F$ ($mg.L^{-1}$)	DBO_5 $_T$ ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
121	6,5	135	294	181		100
122	7,28	98	353	273		158
123	7,05	152	411	364	220	158
125			433	341		76
126						
133			183	131	105	110
134	6,75	139	150	68		98
135	6,84	143	164	68	105	58
136	6,52	127	189	121		58
137	6,66	112	214	174		102
138			150	58		88
139	6,81	120	82	26		90
140	6,36	124	188	155	110	96
141	6,2	93	407	282	170	38
142	6,43	130	256	178	140	64
143			331	230		92
157			343	214		
158	6,4		355	197		106
169			249	186		142
170	6,41	124	226	202	200	122
171	6,39		209	162		26
172			233	209		114
173	6,47		268	233	230	140
174			186	160		106
175	6,33		209	171	135	198
177	6,48	133	233	178		76
178	6,4	118	256	186		76
179	6,48		183	146		80
180			186	174	135	120
181			197	176		108
182	6,36	104	247	186		94
183	6,39	265	221	183		242
184			209	169	130	142
185		239	183	98		16

Anexo 8.1. 5 Variables Fisicoquímicas del EP Fase II - muestreo puntual

EP - Fase II						
Día de Operación	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO $_T$ ($mg.L^{-1}$)	DQO $_F$ ($mg.L^{-1}$)	$DBO_{5\ T}$ ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
121	6,08	97	233		110	86
122	6,41	116	266			88
123	6,66	135	298			98
125	7,05	135	322			50
126						72
133			143		90	76
134			75			72
135	6,49	122	228		180	110
136	6,45	127	214			110
137	6,43	116	200		88	86
138	6,54	106	103			64
139			73			48
140	6,34	87	134		90	76
141	6,45	112	150		135	94
142	5,76	91	244	195	135	72
143	6,21		197			48
157			175			48
158			153			118
169	6,49		226	209		98
170			390	188	210	80
171	6,56	131	183	108		62
172	6,35		186	153		78
173			233	171	112	98
174	6,47		209	186		82
175			162	113		
177	6,33	133	137			82
178			113	75		82
179	6,26	97	122	82	58	86
180	6,33		148	94	80	96
181			98	49		68
182	6,85	84	141	89		54
183		265	153	87		
184	6,37		164	122	95	106
185		198	122	63		

Anexo 8.1. 6 Variables Operativas Fase I y II- muestreo puntual

Día de Operación	FASE	Factor α	TRC (d)	OD $_{RC}$ (mg.L^{-1})	OD $_{RE}$ (mg.L^{-1})	T $_{RC}$ (ºC)	T $_{RE}$ (ºC)	SSTLM $_{RC}$ (mg.L^{-1})	SSVLM $_{RC}$ (mg.L^{-1})	SSTLM RECIRCULACIÓN (mg.L^{-1})	SSVLM RECIRCULACIÓN (mg.L^{-1})	SSTLM $_{RE}$ (mg.L^{-1})	SSVLM $_{RE}$ (mg.L^{-1})	COV (kg DBO_5.(m^3.d)$^{-1}$)	Relación A/M (kg DBO_5. (kg SSVLM.d) $^{-1}$)
4	Fase I	0,16	5,21	3,64	3,84	26,0	26,0	1440	1170	8000	5200	3730	2570	0,93	0,44
5	Fase I	0,14	6,64	0,77	3,15	27,8	27,6	1750	1360	12128	7932	5240	3810	0,93	0,31
6	Fase I	0,13	6,65	4,03	3,29	25,9	26,2	1570	1200	5340	3850	5260	3780	0,93	0,32
8	Fase I	0,16		4,21	3,57	26,0	26,4	3200	2340	8834	6044	8320	5930	1,16	0,24
9	Fase I	0,15		2,11	2,51	28,8	28,6	2620	1920	14100	9600	7150	5040	1,16	0,29
11	Fase I	0,15	1,97	2,84	3,79	27,2	27,7	2620	1920	14100	9600	7150	5040	1,23	0,31
19	Fase I	0,13	2,33					700	470	16240	7580	2370	1610	1,23	0,99
20	Fase I	0,13	10,65	3,60	2,48	24,7	24,9	1980	1330	6120	4220	6230	4200	1,23	0,38
21	Fase I	0,13	9,25	2,90	2,51	25,6	25,6	1980	1330	6120	4220	6230	4200	1,49	0,46
22	Fase I	0,16	6,42	3,43	2,01	27,0	27,3	1820	1270	9240	6480	4740	3320	0,97	0,37
23	Fase I	0,16	6,09	3,42	2,12	26,1	26,2	1820	1270	9240	6480	4740	3320	0,97	0,37
24	Fase I	0,17	5,69	4,13	3,13	25,7	26,6	2080	1550	8220	5460	4950	3420	0,97	0,35
25	Fase I	0,17	3,16	5,96	4,28	26,0	26,2	1910	1350	7480	5208	4510	3200	0,97	0,37
26	Fase I	0,20	3,76	3,70	2,05	26,8	27,1	2040	1510	10920	7120	3960	2740	1,83	0,78
27	Fase I	0,16	6,30					2400	1750	6460	4220	5950	4140	1,38	0,41
28	Fase I	0,17	5,78					2400	1720	6610	4570	5680	3940	1,60	0,50
29	Fase I	0,16	5,25	3,37	3,97	25,4	26,1	1870	1420	8880	5960	4860	3430	1,60	0,58
30	Fase I	0,22	6,08	3,27	3,00	27,7	27,9	2550	1850	2050	1402	4380	3070	2,74	1,03
31	Fase I	0,22		3,79	3,82	27,7	27,8	2550	1850	2050	1402	4380	3070	2,79	1,04
32	Fase I	0,25	5,44	2,50	3,42	26,2	26,8	2590	1870	1236	856	3850	2720	2,29	0,94
33	Fase I	0,25						2590	1870	1236	856	3850	2720	2,29	0,94
36	Fase I	0,13	4,16	2,63	3,06	26,6	26,9	1270	910	962	670	4290	2950	3,78	1,65
37	Fase I	0,12	4,67	2,01	2,67	26,7	26,7	1220	840	1394	944	4280	2940	1,86	0,82
38	Fase I	0,13	5,97					1180	820	600	430	3670	2610	1,86	0,92
39	Fase I	0,13						1180	820	600	430	3670	2610	1,86	0,92
48	Fase I	0,14	7,54			29,3	29,4	1120	880	2880	2050	3200	2300	1,68	0,92
50	Fase I	0,21	5,92	2,39	2,39	25,5	26,0	1780	1260	6378	4338	3250	2290	1,88	0,96
51	Fase I	0,10	6,32	2,18	3,48	26,6	26,7	690	520	5080	3320	2900	2020	2,27	1,48
52	Fase I	0,12	6,68	3,68	2,64	26,8	26,1	930	650	5080	3320	3440	2380	2,27	1,25
53	Fase I	0,21	5,39					1650	1180	4500	3090	3010	2080	1,90	1,06
54	Fase I	0,33	3,61	2,13	2,10	27,3	29,0	2470	1830	4240	3070	2430	1810	1,90	1,05
55	Fase I	0,16	3,68	2,70	2,55	29,2	29,9	1200	980	5730	4140	3050	2280	2,18	1,17
56	Fase I	0,14	6,03	3,37	2,36	27,8	28,3	1200	980	1220	930	3590	2670	2,29	1,08
58	Fase I	0,22	7,32	2,87	2,62	27,7	28,1	2260	1700	3520	2570	3940	2850	2,29	0,92

Día de Operación	FASE	Factor α	TRC (d)	OD $_{RC}$ (mg.L^{-1})	OD $_{RE}$ (mg.L^{-1})	T $_{RC}$ (ºC)	T $_{RE}$ (ºC)	SSTLM $_{RC}$ (mg.L^{-1})	SSVLM $_{RC}$ (mg.L^{-1})	SSTLM RECIRCULACIÓN (mg.L^{-1})	SSVLM RECIRCULACIÓN (mg.L^{-1})	SSTLM $_{RE}$ (mg.L^{-1})	SSVLM $_{RE}$ (mg.L^{-1})	COV (kg DBO_5.(m^3.d)$^{-1}$)	Relación A/M (kg DBO_5. (kg SSVLM.d) $^{-1}$)
71	Fase I	0,15	5,40	2,64	1,40	27,9	28,1	1260	930	4540	3210	3440	2490	2,09	1,05
72	Fase I	0,15	6,08	2,61	2,57	26,0	26,4	1260	1260	3670	2820	3590	2670	1,57	0,71
76	Fase I	0,23	12,70	3,00	2,93	26,2	26,8	1890	1450	4180	3180	2980	2330	0,46	0,22
80	Fase I	0,28						2590	1960	4180	3180	3180	2490	1,81	0,78
81	Fase I	0,28		4,12	5,49	28,4	28,8	2420	1860	6350	4690	2980	2210	1,81	0,86
83	Fase I	0,12	7,90	2,10	2,40	26,7	26,7	1110	910	6350	4690	4030	3040	1,81	0,77
84	Fase I	0,14	6,71	1,18	3,77	27,5	27,8	1350	1070	4890	3580	4060	2990	1,81	0,77
85	Fase I	0,16	6,22					1360	1030	8956	6034	3510	2540	1,32	0,65
86	Fase I	0,13	6,76	2,86	2,45	29,1	29,7	1300	1050	3830	2860	4290	3160	0,84	0,34
87	Fase I	0,11	6,74	3,60	2,93	26,9	27,4	1520	1180	3150	2350	5720	4200	0,96	0,30
88	Fase I	0,21	5,40	3,31	2,26	26,9	27,2	1260	980	2830	2190	2310	1860	1,02	0,65
91	Fase I	0,37	3,57					2330	1770	2430	1750	1960	1500	1,40	0,88
92	Fase I	0,37						2330	1770	2430	1750	1960	1500	1,40	0,88
93	Fase I	0,10	5,63	3,03	3,85		28,0	730	610	4260	3150	3170	2380	1,61	0,90
94	Fase I	0,10	5,90	5,30	4,54	28,7	29,1	730	610	4260	3150	3170	2380	1,61	0,90
106	Fase I	0,24	5,34	2,88	2,24	28,1	28,1	2290	1670	4130	2960	3470	2500	0,76	0,34
107	Fase I	0,18	5,79	2,20	2,39	27,8	27,8	1800	1270	1360		3860	2780	1,14	0,50
108	Fase I	0,24	5,62	2,87	2,31	26,5	26,8	2460	1800	5100	3830	3860	2780	1,23	0,50
109	Fase I	0,16	5,07	4,33	4,84	27,4	27,7	1540	1170	7630	5640	3890	2860	1,34	0,58
110	Fase I	0,18	5,20	2,74	2,09	27,4	27,6	1460	1090	3990	2980	3280	2480	1,31	0,65
111	Fase I	0,21	5,11	3,32		26,9		1960	1480	7680	5760	3600	2680	1,90	0,83
112	Fase I	0,15	5,38	3,05	1,49	26,5	27,1	1890	1430	8770	6530	5110	3790	1,31	0,43
113	Fase I	0,15	5,74	2,53	3,56	27,8	27,8	1490	1090	5140	3780	4180	3050	1,31	0,54
114	Fase I	0,15		3,74	2,43	27,3	27,5	1210	883	6420	4687	3310	2416	0,96	0,50
121	Fase II	0,12	7,33	2,98	3,06	27,7	27,9	1100	740	5050	3320	3940	3160	1,36	0,57
122	Fase II	0,15	6,55	2,15	3,48	27,3	27,7	1670	1220	5610	4340	4530	3420	1,36	0,50
123	Fase II	0,15	5,98	2,20	2,58	26,9	27,5	1670	1220	5610	4340	4530	3420	1,90	0,70
125	Fase II	0,21	5,65	2,75	2,92	27,1	28,0	1840	850	8320	3540	3450	1400	2,00	1,64
126	Fase II	0,29		2,61	2,28	28,5	28,5	2620	1990	4400	3370	3170	2270	0,85	0,39
133	Fase II	0,13	6,01	2,85	2,44	25,6	26,6	1270	960	6480	4730	4260	3140	0,85	0,35
134	Fase II	0,18	5,71	2,93	2,70	25,9	26,2	1620	1570	6400	4690	3690	2690	0,70	0,30
135	Fase II	0,16	5,30	3,81	3,56	25,5	25,4	1470	1040	4340	3100	3670	2630	0,76	0,36
136	Fase II	0,14	5,09	2,75	2,52	27,1	27,2	1470	1080	6730	4850	4270	3310	0,99	0,38
137	Fase II	0,19	5,63	2,34	2,65	27,6	27,6	2140	1570	6720	4870	4370	3220	0,99	0,37







Día de Operación	FASE	Factor α	TRC (d)	OD $_{RC}$ (mg.L^{-1})	OD $_{RE}$ (mg.L^{-1})	T $_{RC}$ (ºC)	T $_{RE}$ (ºC)	SSTLM $_{RC}$ (mg.L^{-1})	SSVLM $_{RC}$ (mg.L^{-1})	SSTLM RECIRCULACIÓN (mg.L^{-1})	SSVLM RECIRCULACIÓN (mg.L^{-1})	SSTLM $_{RE}$ (mg.L^{-1})	SSVLM $_{RE}$ (mg.L^{-1})	COV (kg DBO_5.(m^3.d)$^{-1}$)	Relación A/M (kg DBO_5. (kg SSVLM.d) $^{-1}$)
138	Fase II	0,12	4,22	3,02	2,25	26,4	26,6	1280	960	4580	3350	4500	3350	0,70	0,27
139	Fase II	0,16	5,56					1700	1250	8510	6190	4390	3180	0,38	0,15
140	Fase II	0,14	5,94	3,15	2,89	25,8	26,3	1560	1190	6350	4660	4470	3320	0,87	0,33
141	Fase II	0,13	5,65	2,03	1,95	26,8	26,9	1250	1000	6340	3700	3890	2180	1,88	1,05
142	Fase II	0,13	3,93	4,60	4,84	25,7	26,0	1570	1250	8720	6590	5230	3960	1,19	0,39
143	Fase II	0,18	4,39	2,58	3,09	26,0	26,2	2140	1650	8990	6820	4710	3560	1,64	0,56
157	Fase II	0,18						2140	1650	8990	6820	4710	3560	1,64	0,56
158	Fase II	0,22	7,12					2280	1750	6270	4730	3950	2940	1,64	0,64
169	Fase II	0,11	5,92	2,29	2,31	27,9	28,1	2180	1610	8280	6220	8330	6800	1,15	0,23
170	Fase II	0,16	5,56	2,02	2,28	28,0	28,3	2050	1560	8280	6220	5210	3770	1,04	0,34
171	Fase II	0,19	3,97	3,25	1,15	28,0	28,4	2260	1640	8560	6370	4740	3530	0,97	0,33
172	Fase II	0,13	3,57	3,52	3,19	28,4	28,9	1770	1270	5520	4150	5740	4280	1,08	0,33
173	Fase II	0,13	4,36	3,04	2,18	28,2	28,8	1770	1270	5520	4150	5740	4280	1,24	0,38
174	Fase II	0,18	5,35	3,04	2,64	27,9	28,4	2360	1690	3990	3040	5260	3990	0,86	0,27
175	Fase II	0,11	5,69					1590	1190	3990	3040	5920	4440	0,97	0,29
177	Fase II	0,11	6,06	3,19	3,94	27,6	28,0	1350	1030	7000	5270	5500	4030	0,97	0,32
178	Fase II	0,11	4,58	2,33	2,24	27,8	28,2	1350	1030	7000	5270	5500	4030	1,19	0,39
179	Fase II	0,07	6,58	2,57	2,30	28,0	28,2	1140	860	5400	4060	7050	5480	0,85	0,21
180	Fase II	0,17	5,68	2,92	3,32	27,1	27,6	1960	1410	6590	4920	4680	3420	0,86	0,31
181	Fase II	0,13	5,40	2,82	3,00	27,3	27,3	1630	1260	8170	6100	5430	4090	0,91	0,29
182	Fase II	0,24	3,70	3,51	2,88	28,1	28,1	1890	1490	7210	5550	2840	2210	1,14	0,58
183	Fase II	0,16	5,92	3,32	3,04		28,6	2700	1970	6540	4830	7050	5320	1,02	0,24
184	Fase II	0,14	3,18	2,63	2,70	27,7	27,9	1760	1180	5720	3900	5040	4040	0,97	0,31
185	Fase II	0,17	3,45	4,03	3,28	27,5	27,5	1000	800	3710	3030	2400	2520	0,85	0,43

Anexo 8.1. 7 SST y SSV en el lodo secundario Fase I - muestreo puntual

FASE I																
Día de Operación	PRINCIPAL				SECUNDARIA				FLOTANTE				ESPUMA			
	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)
4	180	6960	4360	1,25	60	2276	1218	0,14								
5	120	8842	5844	1,06	60	2862	1660	0,17	26	7820	5060	0,20				
6	240	15040	10080	3,61	490	1050	790	0,51	32	8100	5120	0,26				
8	150	9656	6590	1,45	100	4340	2900	0,43	25	8780	5920	0,22		4960	3620	
9	150	8828	6020	1,32	60	6960	4680	0,42	20	9590	6782	0,19		17258	12474	
11	200	7860	5160	1,57	60	7560	5020	0,45	980	15080	10220	14,78	20	16960	11660	0,34
19	60	9620	6140	0,58	120	720	510	0,09	180	19740	12760	3,55				
20	180	5280	3360	0,95	120	506	346	0,06	12	2760	1640	0,03				
21	420	5280	3360	2,22	120	506	346	0,06	30	2760	1640	0,08	24	7840	5140	0,19
22	420	5240	3380	2,20	540	2700	1820	1,46								
23	600	6040	4000	3,62	60	1830	1360	0,11					36	3060	1940	0,11
24	300	6060	4140	1,82	100	3020	1980	0,30					40	5016	3410	0,20
25	240	5938	4140	1,43	120	11082	7790	1,33	90	28360	19100	2,55	40	5016	3410	0,20
26	180	9172	5976	1,65	60	8000	5200	0,48	60	10820	7200	0,65				
27					300	6840	4500	2,05	220	5266	3414	1,16	180	4160	2720	0,75
28	240	12080	4380	2,90	60	8980	5980	0,54	60	15482	10262	0,93	40	12980	8640	0,52
29	120	7200	4800	0,86	120	9860	6600	1,18	72	8900	6140	0,64	48			
30	120	6042	3982	0,73	40	9260	6060	0,37	47	3220	2140	0,15	60	18660	12720	1,12
32	120	5338	3476	0,64	120	8956	5938	1,07	100	11060	7340	1,11	60	16220	11120	0,97
33	120	4660	3028	0,56	120	6920	4580	0,83	160	9280	6180	1,48	50	6060	4060	0,30
36	60	4860	3220	0,29	60	9122	6050	0,55	140	11600	7680	1,62	70	19820	13380	1,39
37	180	5580	3720	1,00	180	8200	5340	1,48	150	6660	4420	1,00	54	12280	8340	0,66
38	120	6154	4222	0,74	180	9000	6280	1,62	41	4876	3508	0,20				
48	240	2700	1600	0,65	120	3480	2140	0,42					20	7440	4920	0,15
50	120	4220	2840	0,51	180	3216	2132	0,58								
51	120	6150	4146	0,74	80	1960	1240	0,16					20	2720	1808	0,05
52	120	9470	6440	1,14	60	4560	3080	0,27	12	6740	4680	0,08	20	4648	3232	0,09
53	240	5800	3920	1,39	120	5620	3820	0,67	9	2088	1364	0,02	32	14200	9860	0,45
54	120	8104	5586	0,97	90	14180	9960	1,28	36	5640	3800	0,20	12	6882	4686	0,08
55	60	7240	4960	0,43	100	10340	7120	1,03	17	2676	1790	0,05	25	6164	4306	0,15
56	140	5590	3824	0,78	120	10360	7120	1,24	39	3178	2128	0,12	12	2120	1420	0,03
58	300	4024	2682	1,21	100	4432	2990	0,44	84	10200	7100	0,86	15	7220	5000	0,11

FASE I																
Día de Operación	PRINCIPAL				SECUNDARIA				FLOTANTE				ESPUMA			
	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)
71	360	4286	2846	1,54	120	4080	2680	0,49								
72	360	4260	2960	1,53	120	8960	6280	1,08								
76	120	5620	3220	0,67	130	8940	6360	1,16	19	6462	4508	0,12				
83	300	7454	5190	2,24	60	1350	1070	0,08								
84	460	5080	3520	2,34		6460	4520						12			
85	330	7920	5320	2,61					44	6710	4710	0,30				
86	280	9760	6740	2,73	60	4960	3260	0,30								
87	390	3242	2362	1,26	120	11720	8380	1,41	123	3596	2450	0,44	5	7760	4562	0,04
88	60	3552	2420	0,21	60				200	7600	5320	1,52				
92	60	3648	2554	0,22	80	16240	11720	1,30	180	22300	16080	4,01				
93	240	3960	2760	0,95	120	10840	7660	1,30	157	6988	4738	1,10				
94									269	6560	4760	1,76	7	4600	3560	0,03
106	120	5300	3660	0,64	60	3106	2118	0,19								
107	300	6810	4846	2,04	180	2680	1824	0,48								
108	420	7800	5520	3,28	60											
109	550	7560	5340	4,16												
110	310	7054	4992	2,19					55	5100	3640	0,28				
111	190	6760	4780	1,28	40	4180	2980	0,17	74	9000	6580	0,67				
112	600	6420	4600	3,85	40	1666	1058	0,07	44	3280	2280	0,14				
113	120	9740	6980	1,17	120	9780	7040	1,17	44	4738	3300	0,21				
114									111	4674	3272	0,52				

Anexo 8.1. 8 SST y SSV en el lodo secundario Fase I - muestreo puntual

FASE II												
Día de Operación	PRINCIPAL				SECUNDARIA				FLOTANTE			
	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)	V ($L.d^{-1}$)	ST ($mg.L^{-1}$)	SV ($mg.L^{-1}$)	Carga ($kg\ SST.d^{-1}$)
121	360	6516	3752	2,35	20	5740	3800	0,11		4240	3620	
122	480	7000	5000	3,36		7638	5500					
123	480	7000	5000	3,36	48	7638	5500	0,37				
125	60	6342	2792	0,38		12540	5420		168	5400	2460	0,91
133	670	2794	1962	1,87	240	2540	1680	0,61				
134	60	4800	3400	0,29	60	9780	6970	0,59				
135	180	5040	3440	0,91	240	10720	7530	2,57				
136	140	5500	3820	0,77	260	14380	10100	3,74				
137	60	9620	6720	0,58	180	12980	9060	2,34	43	5820	3980	0,25
138					420	12208	8568	5,13				
139	240	6510	4710	1,56	184	9200	6540	1,69				
140		7700	5560		470	6890	4460	3,24	48			
141	260				440	7600	4850	3,34				
142	120	7780	5660	0,93	360	19200	9620	6,91				
143	60	7180	5360	0,43	280	11540	8400	3,23	35	8100	5800	0,28
158	240	6280	4480	1,51	120	4086	2818	0,49		5780	4060	
169	620	9186	6266	5,70					110	7060	4940	0,78
170	600	8106	5706	4,86	120	3040	1960	0,36	116	16232	11362	1,88
171	60	10280	7460	0,62					216	21940	16124	4,74
172	480	11260	7760	5,40					103	16280	12020	1,68
173	120	11260	7760	1,35					159	16280	12020	2,59
174	180	10300	7620	1,85					132	17280	12890	2,28
175	300	7300	5460	2,19	32	3640	2720	0,12	95	16120	12040	1,53
177	240	8412	6140	2,02	60	4060	2800	0,24		12616	9188	
178	60	8412	6140	0,50	118	4060	2800	0,48	222	12616	9188	2,80
179	600	6380	4700	3,83					31	5180	3800	0,16
180	60	5544	3688	0,33	210	7900	5900	1,66	92	8328	6132	0,77
181	480	7640	5400	3,67					53	5776	4274	0,31
182	60	7260	5140	0,44	360	11340	8060	4,08	68	5200	3700	0,35
184	300	7596	5300	2,28	540	9630	6464	5,20				
185	60	6144	4208	0,37	540	7184	4922	3,88	31	12740	8940	0,39

Anexo 8.1. 9 Variables Fisicoquímicas del ES Fase I y II - muestreo puntual

Día de Operación	FASE	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO T ($mg.L^{-1}$)	DBO_5 T ($mg.L^{-1}$)	SST ($mg.L^{-1}$)
4	Fase I			91		16
5	Fase I			91		16
6	Fase I			91		16
8	Fase I	6,65	124	85		4
9	Fase I			85	70	6
11	Fase I	6,63	65	84		16
19	Fase I	6,87	90	84		16
20	Fase I	6,60	88	84		16
21	Fase I	6,67	114	78	50	16
22	Fase I			78		6
23	Fase I	6,51	116	78		6
24	Fase I	6,62		78		28
25	Fase I	6,61	119	90		42
26	Fase I	6,72	98	70	60	38
27	Fase I	6,68	126	80		16
28	Fase I	6,50		75		22
29	Fase I	6,74	111	67		28
30	Fase I	6,53	80	49		22
31	Fase I			48		22
32	Fase I	6,74	98	59		12
33	Fase I			59		12
36	Fase I			42	37	20
37	Fase I	6,71	137	83	45	12
38	Fase I			83		12
39	Fase I			83		12
48	Fase I	6,59	116	18	12	16
50	Fase I	6,35		37		26
51	Fase I	6,70	127	51	36	18
52	Fase I	6,83	84	51		12
53	Fase I	6,79	103	33		8
54	Fase I	6,91	111	33		28
55	Fase I	6,72	170	96	75	36
56	Fase I	6,73	120	50	35	14
58	Fase I	6,77	154	50		8
71	Fase I	6,70	118	24	23	18
72	Fase I			24		10
76	Fase I	6,77	83	24		16
80	Fase I			34		16
81	Fase I			34		16
83	Fase I	6,76	150	34		6
84	Fase I	6,73	106	34		12
85	Fase I	6,62	100	34	22	4
86	Fase I	7,39	141	30	24	6
87	Fase I			39		12
88	Fase I	6,69	114	32	17	12
91	Fase I			32		64
92	Fase I	6,71	114	71		64

Día de Operación	FASE	pH (unidades)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3.L^{-1}$)	DQO $_T$ (mg.L^{-1})	DBO_5 T (mg.L^{-1})	SST (mg.L^{-1})
93	Fase I	6,93	150	25	20	12
94	Fase I			25		12
106	Fase I			54		36
107	Fase I			39	30	16
108	Fase I	7,04	151	60	50	6
109	Fase I	6,96	83	27		6
110	Fase I	7,10	98	35		14
111	Fase I			44		28
112	Fase I			27	15	10
113	Fase I			27		32
114	Fase I			45		10
121	Fase II	6,70	170	15		12
122	Fase II	6,31	87	38	27	6
123	Fase II	6,73	64	33		6
125	Fase II			33		14
126	Fase II			40	21	
133	Fase II			66		16
134	Fase II	6,71	97	78	55	34
135	Fase II	6,74	104	78		4
136	Fase II	6,43	91	24	17	4
137	Fase II	7,11	125	42		16
138	Fase II			38		8
139	Fase II	6,75	93	30	25	12
140	Fase II	6,81		23	20	20
141	Fase II	6,98	106	28	20	4
142	Fase II	6,71	27	28		22
143	Fase II			28		32
157	Fase II			27		
158	Fase II	6,71		72		16
169	Fase II			57	38	24
170	Fase II	6,98	91	58		22
171	Fase II	6,66		47		26
172	Fase II			45	29	30
173	Fase II	6,75		51		52
174	Fase II			53	25	16
175	Fase II	6,85		53		18
177	Fase II		135	45		26
178	Fase II	6,70	81	42	23	26
179	Fase II	6,61		36	19	30
180	Fase II			39		32
181	Fase II			42		18
182	Fase II	6,85	76	62		26
183	Fase II	6,37	132	39	28	
184	Fase II			27		24
185	Fase II		129			10

8.1.3 Características de sedimentabilidad del lodo secundario

Anexo 8.1. 10 Índice Volumétrico de Lodos (IVL)

Día de Operación	FASE	IVL RC (mL.g^{-1})	IVL RE (mL.g^{-1})	Día de Operación	FASE	IVL RC (mL.g^{-1})	IVL RE (mL.g^{-1})
6	Fase I	127	173	109	Fase I	175	237
8	Fase I	166	102	110	Fase I	192	274
19	Fase I	500	321	111	Fase I	418	261
20	Fase I	177	128	112	Fase I	317	188
21	Fase I	162	138	113	Fase I	228	230
23	Fase I	170	179	114	Fase I	190	233
24	Fase I	216	158	121	Fase II	300	236
25	Fase I	194	182	122	Fase II	162	208
26	Fase I	147	199	123	Fase II	246	212
27	Fase I	313	150	125	Fase II	234	278
28	Fase I	354	158	126	Fase II	363	303
29	Fase I	299	148	133	Fase II	244	223
30	Fase I	329	210	135	Fase II	218	253
32	Fase I	347	249	136	Fase II	238	180
48	Fase I	268	297	137	Fase II	164	220
50	Fase I	365	249	138	Fase II	188	211
51	Fase I	203	331	139	Fase II	306	216
53	Fase I	327	243	140	Fase II	410	217
54	Fase I	243	370	141	Fase II	224	249
55	Fase I	250	262	142	Fase II	306	182
56	Fase I	333	248	143	Fase II	182	204
58	Fase I	407	244	158	Fase II	404	241
71	Fase I	437	276	170	Fase II	137	180
80	Fase I	239	261	171	Fase II	106	198
81	Fase I	306	309	172	Fase II	141	159
83	Fase I	297	241	173	Fase II	141	162
84	Fase I	274	234	174	Fase II	106	175
85	Fase I	184	245	178	Fase II	326	171
87	Fase I	168	122	179	Fase II	325	138
88	Fase I	238	271	180	Fase II	413	207
91	Fase I	343	255	181	Fase II	190	179
92	Fase I	343	255	182	Fase II	180	342
93	Fase I	247	218	183	Fase II	219	136
94	Fase I	219	293	184	Fase II	233	192
107	Fase I	267	244	185	Fase II	340	400
108	Fase I	98	249				

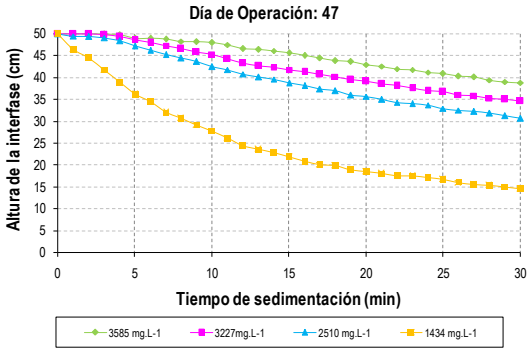
Anexo 8.1. 11 Índice Volumétrico de Lodos Diluido (IVLD)

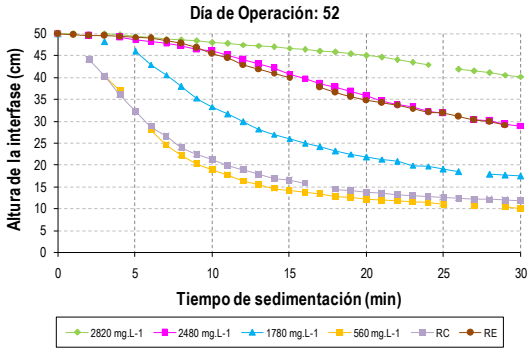
Día de Operación	FASE	IVLD RC ($mL.g^{-1}$)	Día de Operación	FASE	IVLD RC ($mL.g^{-1}$)
93	Fase I	247	142	Fase II	242
96	Fase I	235	143	Fase II	178
101	Fase I	277	152	Fase II	218
102	Fase I	234	153	Fase II	215
104	Fase I	238	154	Fase II	269
105	Fase I	164	155	Fase II	288
107	Fase I	189	156	Fase II	192
108	Fase I	122	158	Fase II	228
109	Fase I	247	159	Fase II	259
112	Fase I	190	160	Fase II	208
113	Fase I	188	161	Fase II	161
115	Fase I	179	162	Fase II	193
116	Fase I	131	163	Fase II	236
117	Fase II	238	164	Fase II	168
118	Fase II	225	165	Fase II	213
119	Fase II	203	166	Fase II	128
122	Fase II	192	170	Fase II	117
123	Fase II	246	171	Fase II	97
125	Fase II	185	172	Fase II	124
126	Fase II	305	173	Fase II	113
130	Fase II	225	174	Fase II	119
131	Fase II	254	175	Fase II	126
133	Fase II	205	178	Fase II	267
134	Fase II	198	179	Fase II	281
135	Fase II	231	180	Fase II	144
136	Fase II	190	181	Fase II	209
138	Fase II	172	182	Fase II	191
139	Fase II	214	183	Fase II	135
140	Fase II	231	184	Fase II	184
141	Fase II	320	185	Fase II	321

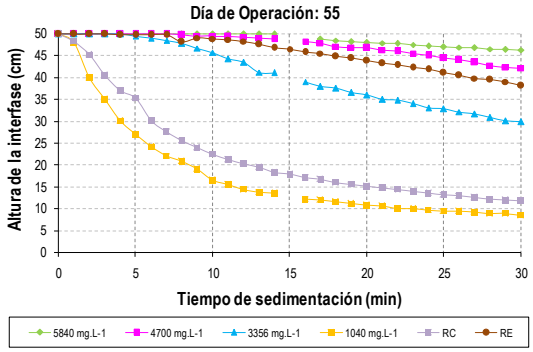
Continuación Anexo 8.1.11 Índice Volumétrico de Lodos Diluido (IVLD)

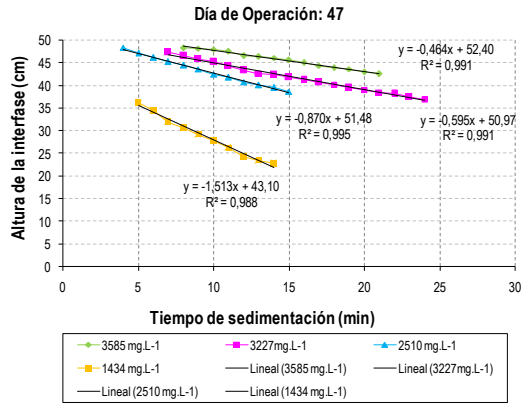
Día de Operación	FASE	IVLD RE ($mL.g^{-1}$)	Día de Operación	FASE	IVLD RE ($mL.g^{-1}$)
93	Fase I	240	153	Fase II	283
102	Fase I	268	154	Fase II	291
104	Fase I	178	160	Fase II	176
105	Fase I	305	161	Fase II	217
107	Fase I	218	162	Fase II	154
108	Fase I	228	163	Fase II	193
109	Fase I	196	164	Fase II	190
113	Fase I	191	165	Fase II	176
115	Fase I	224	166	Fase II	200
117	Fase II	208	170	Fase II	154
118	Fase II	209	171	Fase II	161
119	Fase II	201	172	Fase II	118
122	Fase II	230	173	Fase II	132
123	Fase II	269	174	Fase II	144
125	Fase II	267	175	Fase II	128
126	Fase II	279	178	Fase II	167
130	Fase II	188	179	Fase II	125
131	Fase II	188	180	Fase II	205
133	Fase II	188	181	Fase II	199
135	Fase II	251	183	Fase II	154
136	Fase II	197	184	Fase II	207
138	Fase II	187	185	Fase II	352
139	Fase II	219			

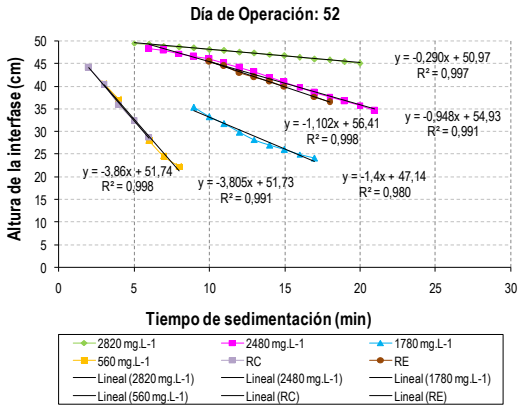
Anexo 8.1. 12 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase I

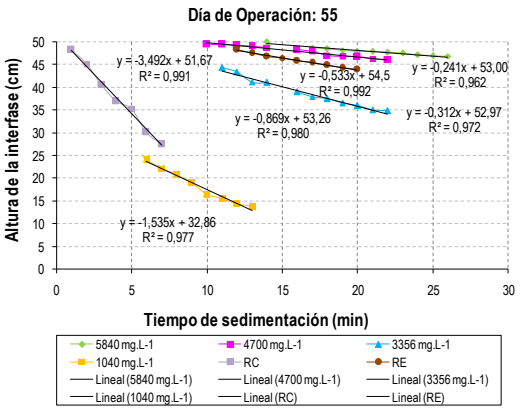




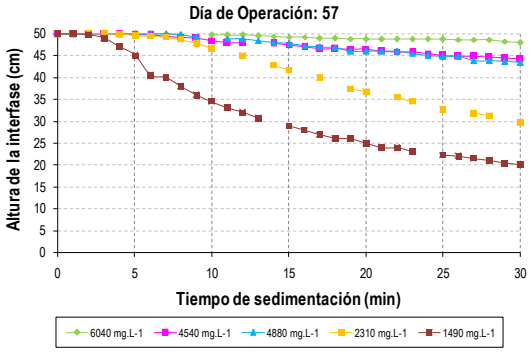


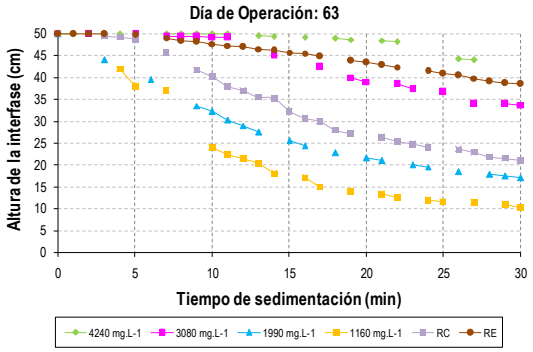


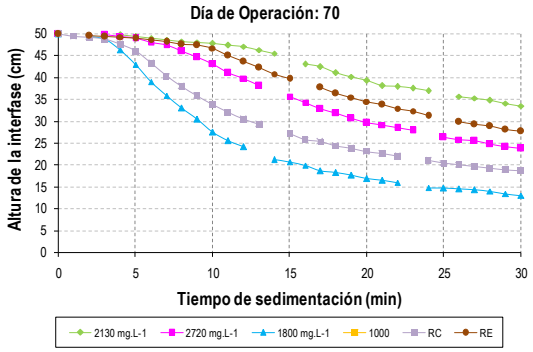


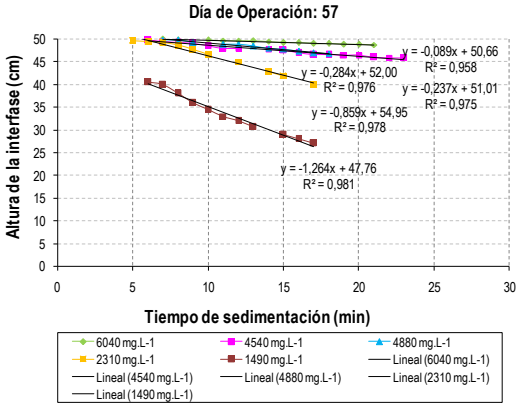


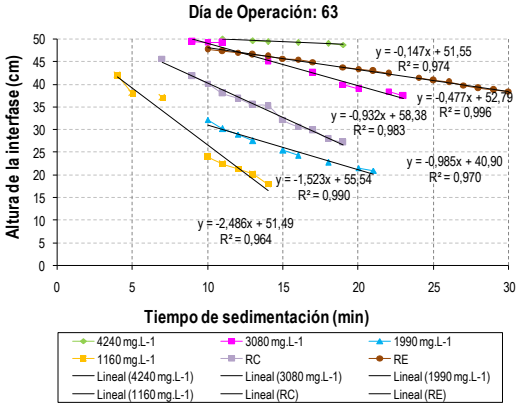
Continuación Anexo 8.1. 12 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase I

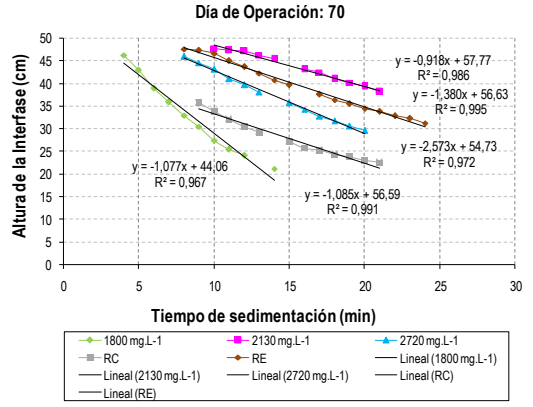




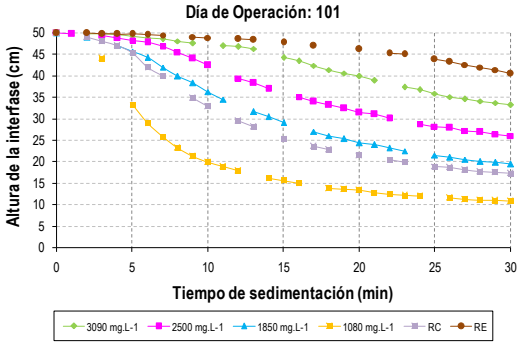


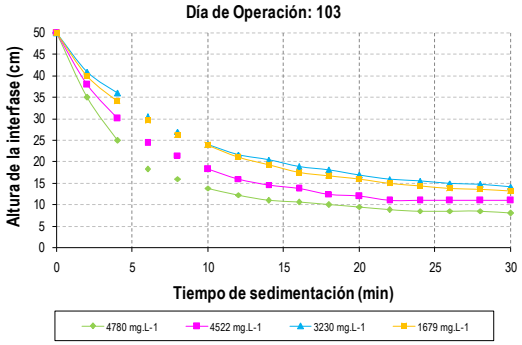


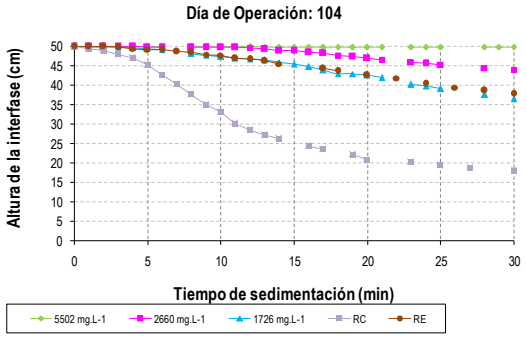


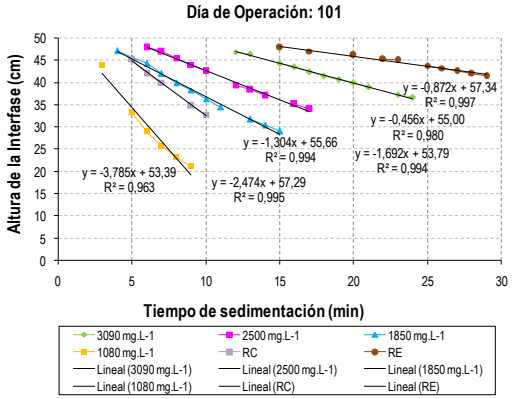


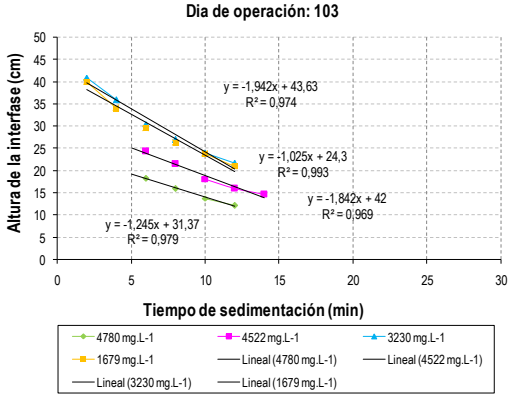
Continuación Anexo 8.1. 12 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase I

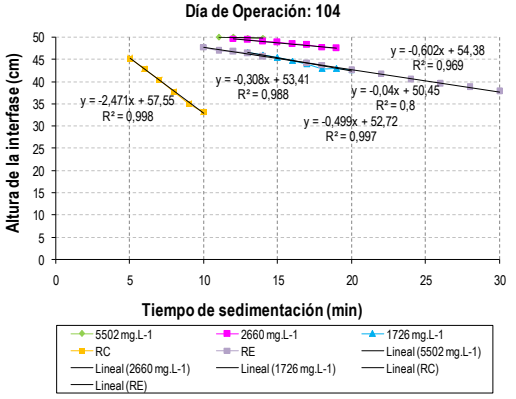




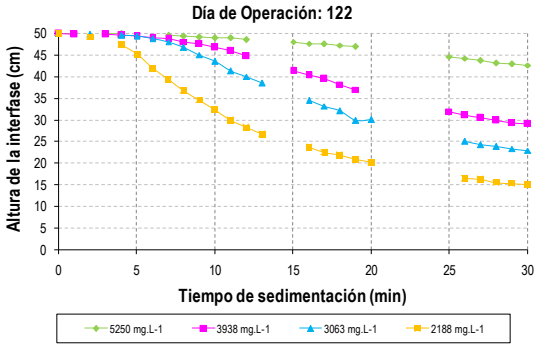


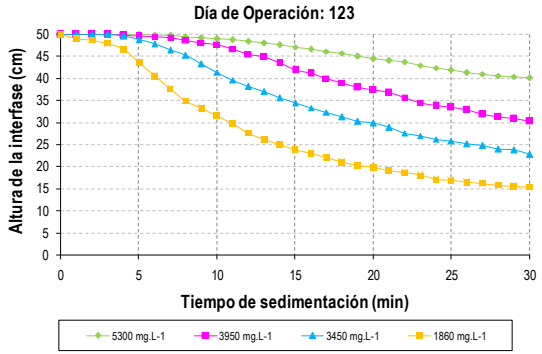


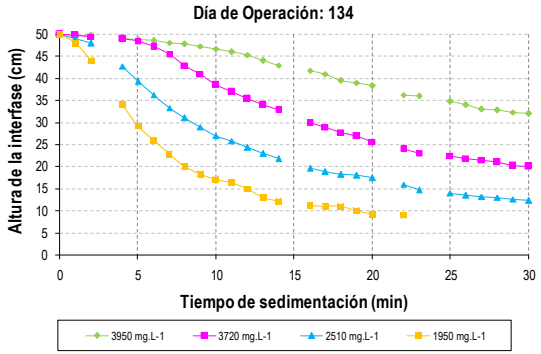


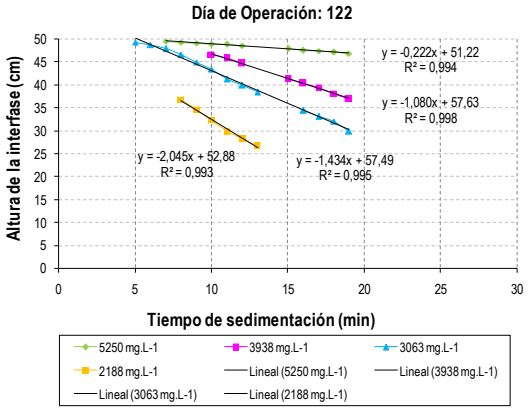


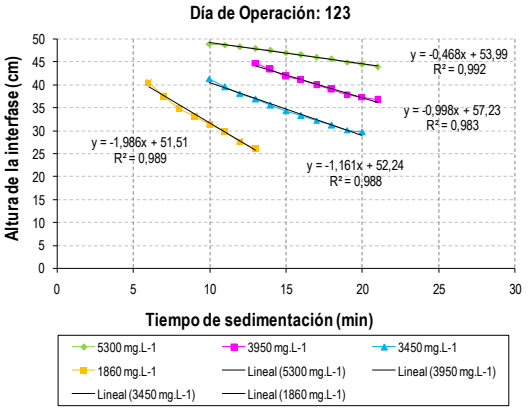
Anexo 8.1. 13 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase II

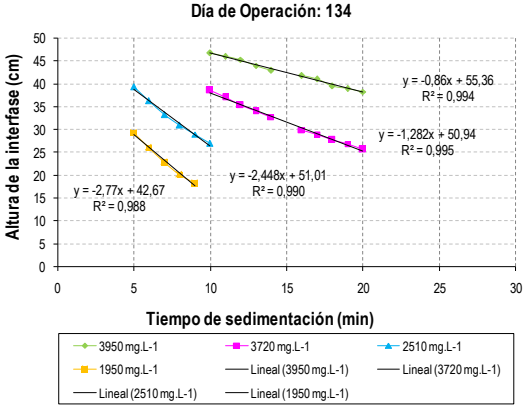




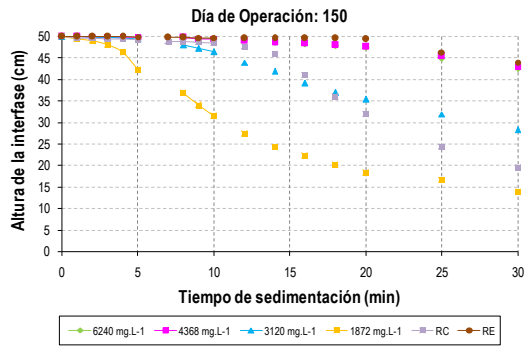


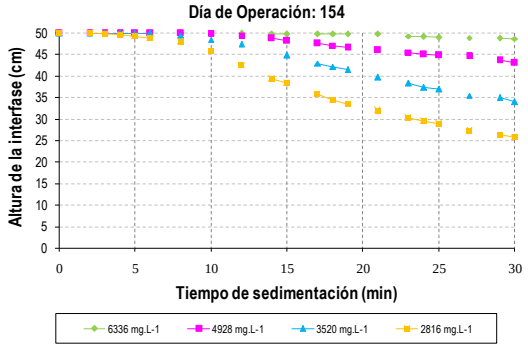


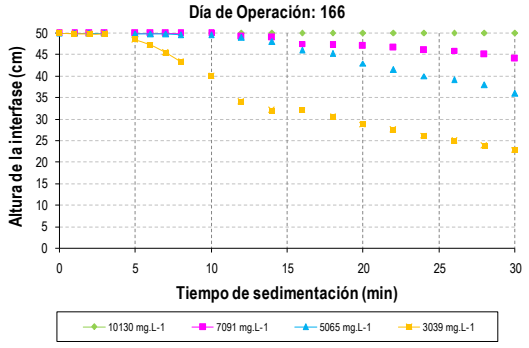


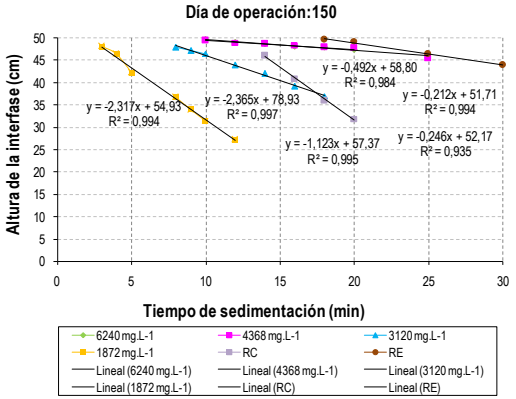


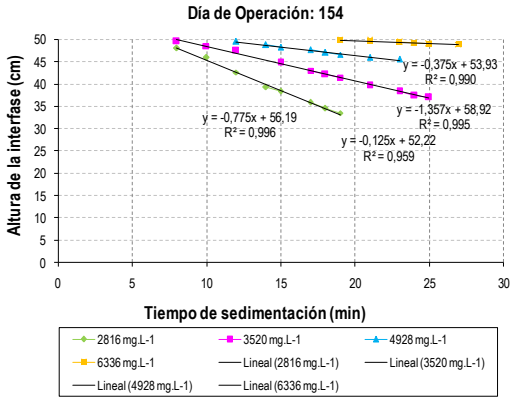
Continuación Anexo 8.1.13 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase II

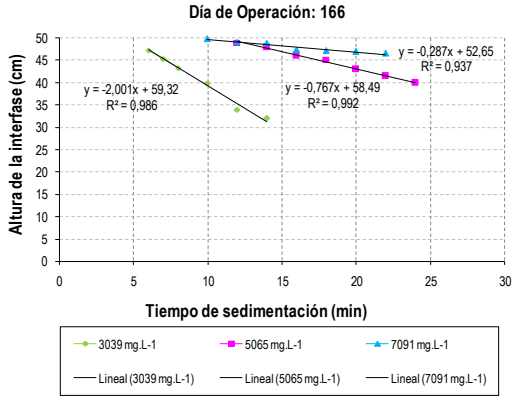




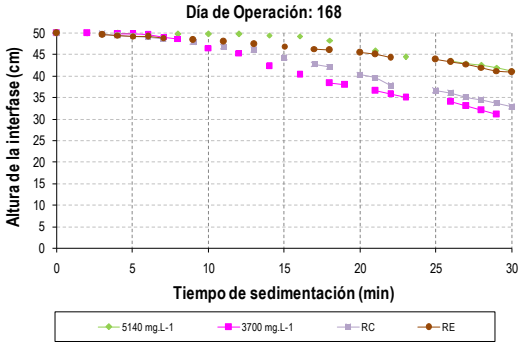


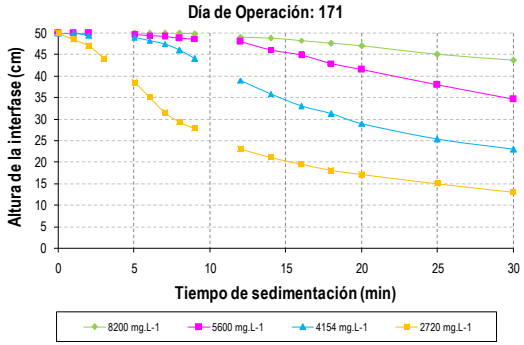


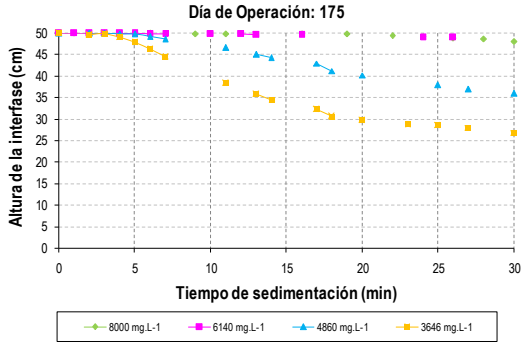


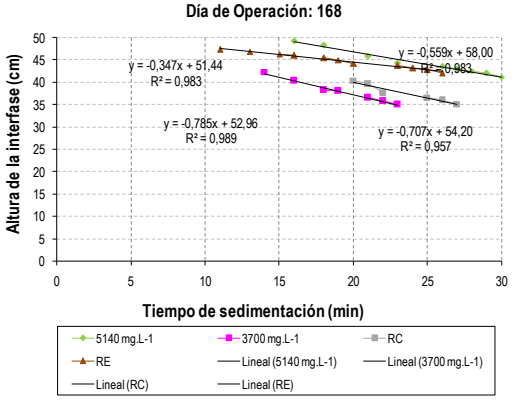


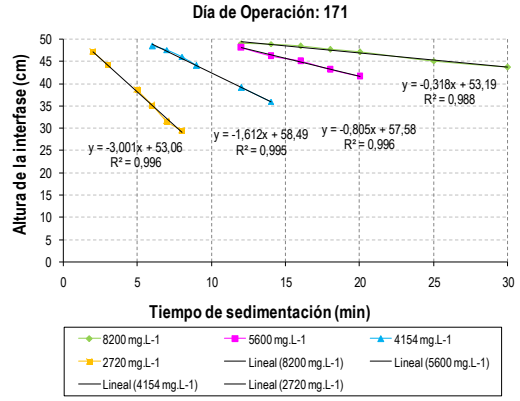
Continuación Anexo 8.1.13 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase II

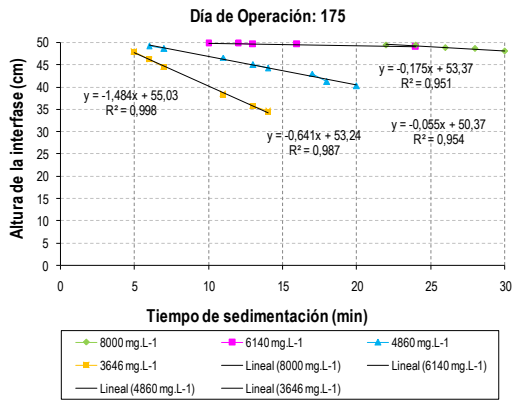




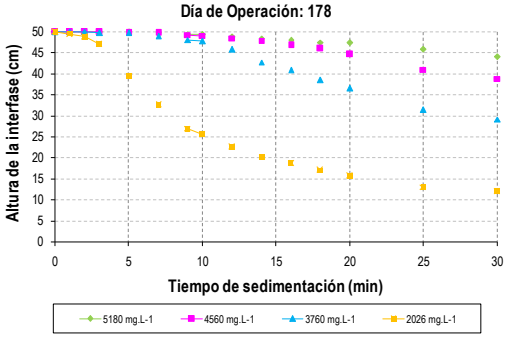


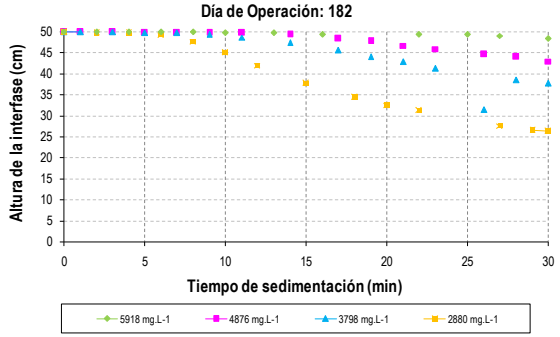


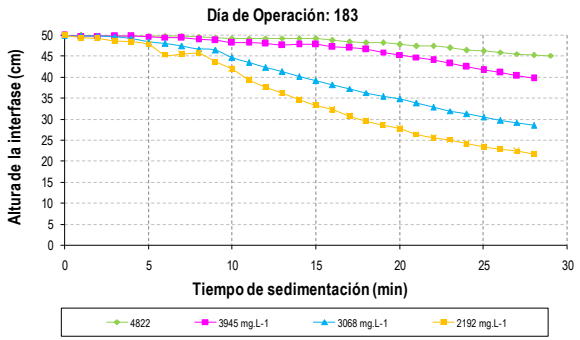


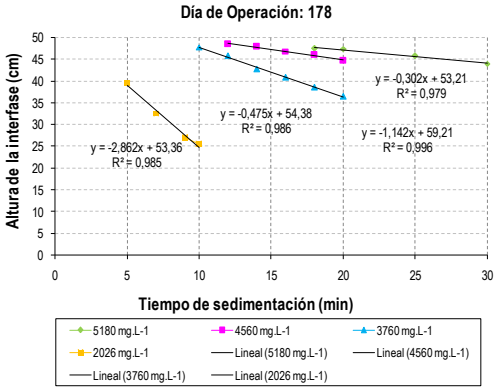


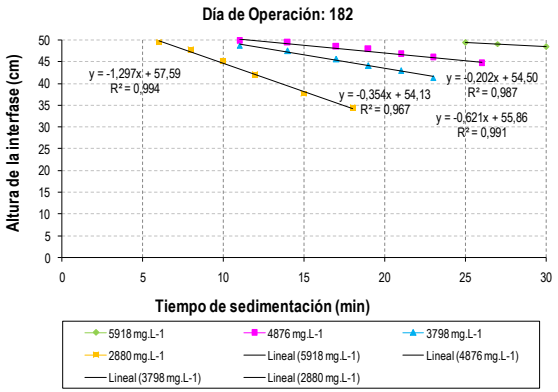
Continuación Anexo 8.1.13 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase II

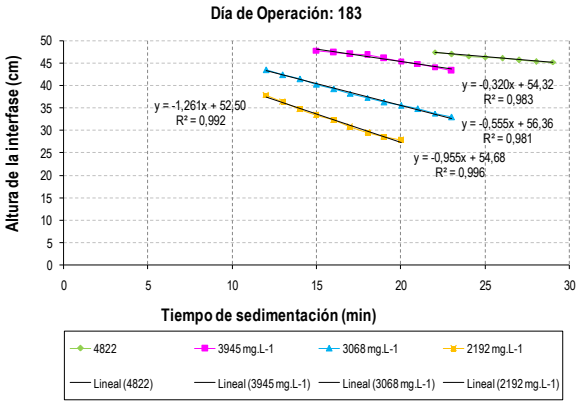




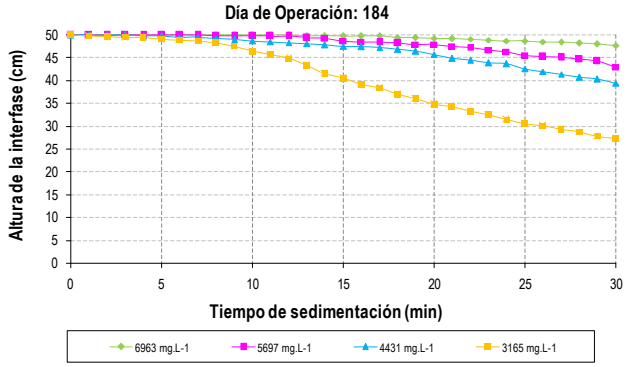


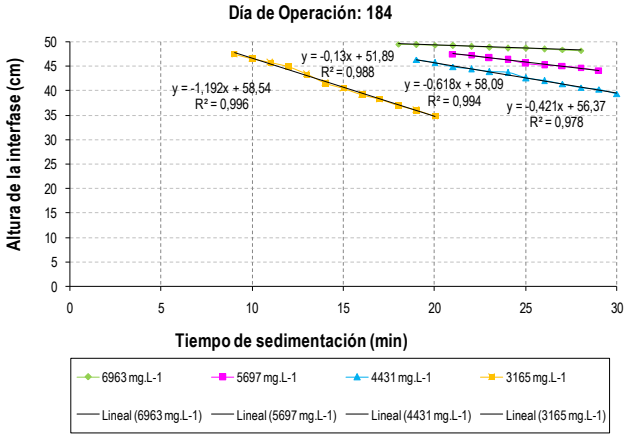






Continuación Anexo 8.1.13 Gráficas para estimar las constantes de Vesilind Fase II





Anexo 8.1. 14 Resumen de las constantes de Vesilind

Día de Operación	FASE	Constante de Vesilind	
		v_o ($m.h^{-1}$)	k ($m^3.kg^{-1}$)
47	Fase I	2,0	0,54
52	Fase I	4,5	1,00
55	Fase I	1,6	0,41
57	Fase I	1,8	0,55
63	Fase I	4,0	0,83
70	Fase I	5,2	0,68
101	Fase I	4,4	0,71
103	Fase I	4,2	0,39
104	Fase I	2,7	0,88
106	Fase I	3,3	0,54
108	Fase I	6,1	0,54
109	Fase I	4,1	0,41
110	Fase I	2,9	0,47
111	Fase I	2,8	0,37
122	Fase II	7,2	0,71
123	Fase II	2,8	0,41
134	Fase II	5,4	0,56
150	Fase II	3,5	0,58
154	Fase II	5,1	0,66
166	Fase II	5,2	0,48
168	Fase II	2,3	0,42
171	Fase II	5,3	0,41
175	Fase II	4,9	0,49
178	Fase II	8,1	0,72
182	Fase II	4,0	0,60
183	Fase II	2,6	0,53
184	Fase II	4,5	0,56

Anexo 8.1.15 Microorganismos observados en la Fase I

Fase	Grupo	Género	Día de operación									
			71	85	94	97	105	108	111	112	114	119
RC Fase I	Ciliado Fijo	*Epistylis sp*	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia
RC Fase I	Ciliado Fijo	*Vorticella sp*	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia
RC Fase I	Ciliado Fijo	*Zoothamnium sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Ciliado Libre nadante	*Didiniumsp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Ciliado Libre nadante	*Litonotus sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia
RC Fase I	Ciliado Libre nadante	*Paramecium sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Ciliado libre reptante	*Aspidisca sp*	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RC Fase I	Ciliado libre reptante	*Euplotes sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Colonia de bacterias	*Zooglea*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Presencia
RC Fase I	Anelido	*Aelosoma sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Rotifero	*Rotaria sp*	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RC Fase I	Rotifero	*Rotifero GNI*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Suctoria	*Podophrya sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Suctoria	*Suctoria GNI*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Suctoria	*Tokophrya sp*	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase I	Zooflagelado	*Paranema sp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RE Fase I	Animal	*Tardigrado*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase I	Ciliado Fijo	*Carchesiumsp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia
RE Fase I	Ciliado Fijo	*Epistylis sp*	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia
RE Fase I	Ciliado Fijo	*Podophrya sp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase I	Ciliado Fijo	*Vorticella sp*	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia
RE Fase I	Ciliado Fijo	*Zoothamnium sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase I	Ciliado Libre nadante	*Didiniumsp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase I	Ciliado Libre nadante	*Litonotus*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia
RE Fase I	Ciliado libre reptante	*Aspidisca sp*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RE Fase I	Ciliado libre reptante	*Euplotes sp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase I	Colonia de bacterias	*Zooglea*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia
RE Fase I	Rotifero	*Rotaria sp*	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia
RE Fase I	Rotifero	*Rotifero GNI*	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase I	Suctoria	*Tokophrya sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase I	Zooflagelado	*Paranema sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia

Anexo 8.1.16 Microorganismos observados en la Fase II

Fase	Grupo	Género	Día de operación											
			126	136	140	142	149	154	156	161	163	171	175	183
RC Fase II	Ciliado Fijo	*Epistylis sp*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia
RC Fase II	Ciliado Fijo	*Vorticella sp*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RC Fase II	Ciliado Fijo	*Zoothamnium sp*	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Ausencia
RC Fase II	Ciliado Libre nadante	*Didiniumsp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Ciliado Libre nadante	*Litonotus sp*	Ausencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Ciliado Libre nadante	*Paramecium sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Ciliado libre reptante	*Aspidisca sp*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RC Fase II	Ciliado libre reptante	*Euplotes sp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Colonia de bacterias	*Zooglea*	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RC Fase II	Anelido	*Aelosoma sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Rotifero	*Rotaria sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Rotifero	*Rotifero GNI*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RC Fase II	Suctoria	*Podophrya sp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Suctoria	*Suctoria GNI*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia
RC Fase II	Suctoria	*Tokophrya sp*	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia
RC Fase II	Zooflagelado	*Paranema sp*	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Animal	*Tardigrado*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Ciliado Fijo	*Carchesiumsp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Ciliado Fijo	*Epistylis sp*	Presencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia
RE Fase II	Ciliado Fijo	*Podophrya sp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Ciliado Fijo	*Vorticella sp*	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RE Fase II	Ciliado Fijo	*Zoothamnium sp*	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia
RE Fase II	Ciliado Libre nadante	*Didiniumsp*	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Ciliado Libre nadante	*Litonotus*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Ciliado libre reptante	*Aspidisca sp*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RE Fase II	Ciliado libre reptante	*Euplotes sp*	Ausencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Colonia de bacterias	*Zooglea*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia
RE Fase II	Rotifero	*Rotaria sp*	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Rotifero	*Rotifero GNI*	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
RE Fase II	Suctoria	*Tokophrya sp*	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia
RE Fase II	Zooflagelado	*Paranema sp*	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia

8.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

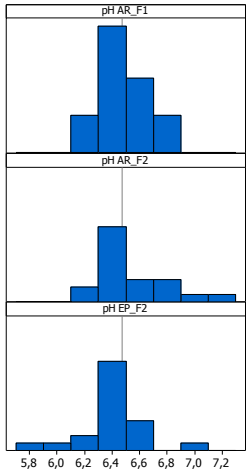
Anexo 8.2. 1 ANOVA pH DEL ARd Fase I, ARd Fase II y EP

ANOVA de un factor para pH AR_F1. pH AR_F2. pH EP_F2
Tarjeta de informe

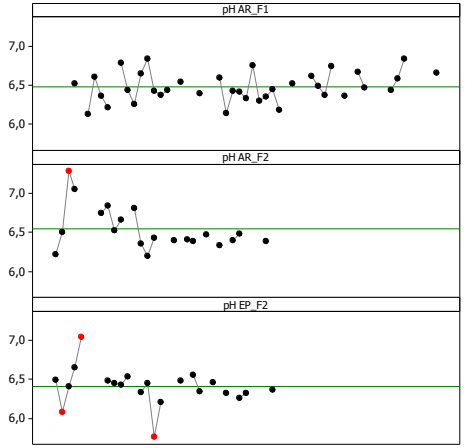
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que que hay diferencias entre las medias. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. El Informe de potencia muestra que, de acuerdo con los tamaños de sus muestras y el nivel de significancia, usted tiene por lo menos una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,3 entre cualesquiera dos medias. Algunos profesionales consideran que un 80% de probabilidad de detección es suficiente. Si esto se aplica a su caso, usted puede concluir que no es probable que existan diferencias de 0,3 o mayores. Para determinar qué tan grandes deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Normalidad	✓	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

ANOVA de un factor para pH AR_F1. pH AR_F2. pH EP_F2
Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

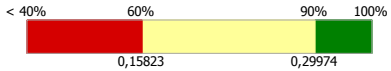


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para pH AR_F1. pH AR_F2. pH EP_F2
Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 0,29974, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 0,15823.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
0,15823	37,6 - 60,0
0,20925	60,0 - 84,8
0,23334	70,0 - 92,1
0,26138	80,0 - 97,0
0,29974	90,0 - 99,6

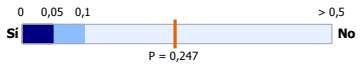
La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 0,26138, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
pH AR_F1	37	6,4749	0,18668	(6,4126. 6,5371)
pH AR_F2	20	6,5445	0,27596	(6,4153. 6,6737)
pH EP_F2	21	6,4062	0,24043	(6,2967. 6,5156)

ANOVA de un factor para pH AR_F1. pH AR_F2. pH EP_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

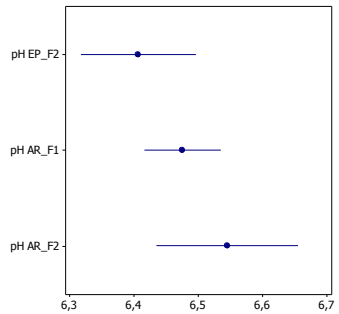


Las diferencias entre las medias no son significativas (p > 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	pH EP_F2	
2	pH AR_F1	No se identificó ninguno
3	pH AR_F2	

Gráfica de comparación de las medias



Comentarios

Usted no puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05.

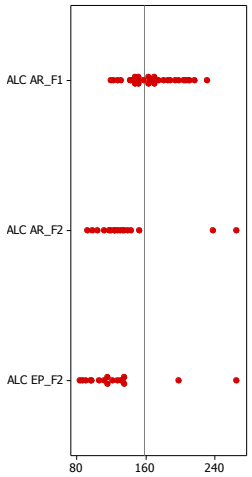
Anexo 8.2. 2 ANOVA Alcalinidad Total del ARd Fase I, ARd Fase II y EP

ANOVA de un factor para ALC AR_F1. ALC AR_F2. ALC EP_F2
Tarjeta de informe

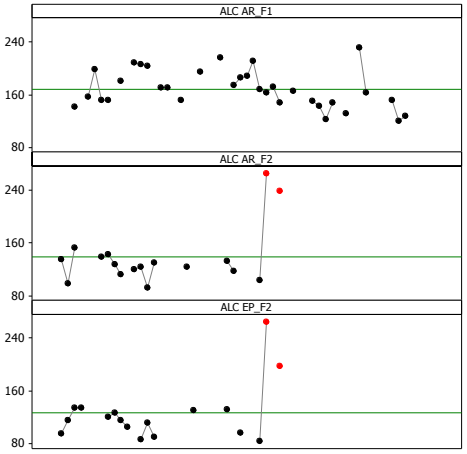
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar diferencias entre las medias.
Normalidad	✓	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

ANOVA de un factor para ALC AR_F1. ALC AR_F2. ALC EP_F2
Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

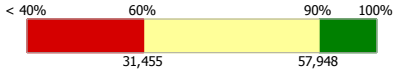


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para ALC AR_F1. ALC AR_F2. ALC EP_F2
Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 57,948, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 31,455.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
31,455	39,6 - 60,0
40,386	60,0 - 82,3
45,054	70,0 - 90,3
50,496	80,0 - 96,1
57,948	90,0 - 99,5

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 50,496, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
ALC AR_F1	33	168,84	28,725	(158,65. 179,02)
ALC AR_F2	17	138,59	45,653	(115,12. 162,06)
ALC EP_F2	17	126,60	44,670	(103,64. 149,57)

ANOVA de un factor para ALC AR_F1. ALC AR_F2. ALC EP_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

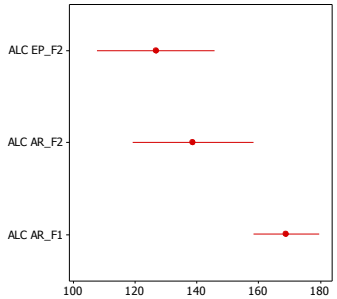


P = 0,002
Las diferencias entre las medias son significativas (p < 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	ALC EP_F2	3
2	ALC AR_F2	3
3	ALC AR_F1	1 2

Gráfica de comparación de las medias
Los intervalos en rojo que no se superponen difieren.



Comentarios

Usted puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05. Utilice la Gráfica de comparación para identificar las medias que difieren. Los intervalos en rojo que no se superponen indican las medias que difieren entre sí. Considere el tamaño de las diferencias para determinar si tienen implicaciones prácticas.

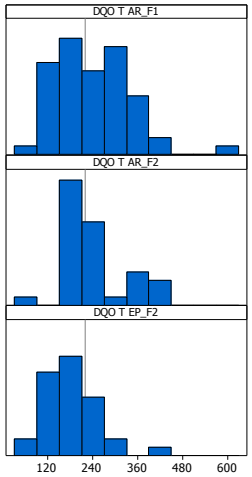
Anexo 8.2. 3 ANOVA DQO Total del ARd Fase I, ARd Fase II y EP

ANOVA de un factor para DQO T AR_F1. DQO T AR_F2. DQO T EP_F2
Tarjeta de informe

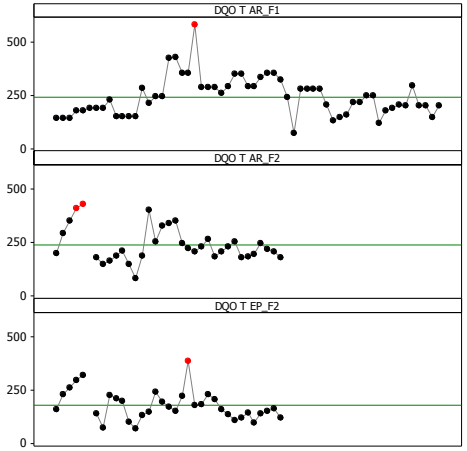
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar diferencias entre las medias.
Normalidad	✓	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

ANOVA de un factor para DQO T AR_F1. DQO T AR_F2. DQO T EP_F2
Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

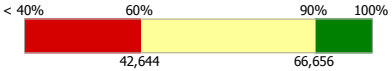


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para DQO T AR_F1. DQO T AR_F2. DQO T EP_F2
Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 66,656, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 42,644.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
42,644	52,0 - 60,0
46,645	60,0 - 68,4
51,962	70,0 - 78,2
58,153	80,0 - 87,0
66,656	90,0 - 94,7

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 58,153, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
DQO T AR_F1	59	242,56	90,653	(218,94. 266,18)
DQO T AR_F2	34	241,04	81,419	(212,64. 269,45)
DQO T EP_F2	34	181,02	69,618	(156,73. 205,31)

ANOVA de un factor para DQO T AR_F1. DQO T AR_F2. DQO T EP_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?



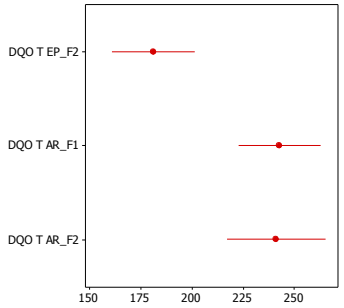
P = 0,001

Las diferencias entre las medias son significativas (p < 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	DQO T EP_F2	2 3
2	DQO T AR_F1	1
3	DQO T AR_F2	1

Gráfica de comparación de las medias
Los intervalos en rojo que no se superponen difieren.



Comentarios

Usted puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05. Utilice la Gráfica de comparación para identificar las medias que difieren. Los intervalos en rojo que no se superponen indican las medias que difieren entre sí. Considere el tamaño de las diferencias para determinar si tienen implicaciones prácticas.

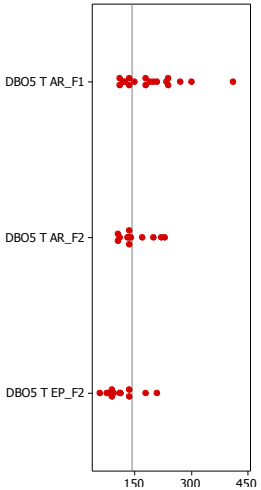
Anexo 8.2. 4 ANOVA DBO_5 Total del ARd Fase I, ARd Fase II y EP

ANOVA de un factor para DBO5 T AR_F1. DBO5 T AR_F2. DBO5 T EP_F2
Tarjeta de informe

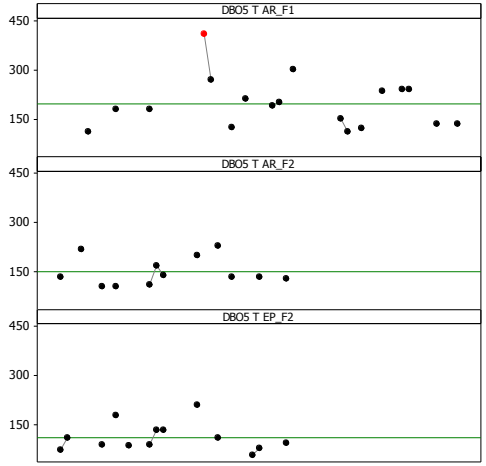
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Un punto de los datos (fila 22) es poco común en comparación con los otros en DBO5 T AR_F1. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar diferencias entre las medias.
Normalidad	⚠	Debido a que algunos tamaños de muestra son menores que 15, la normalidad puede ser un problema. Si los datos no están distribuidos normalmente, el valor p puede ser inexacto con muestras pequeñas. Además, los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados de la prueba. Dado que la normalidad no se puede verificar de forma confiable con muestras pequeñas, usted debería interpretar los resultados de la prueba con precaución.

ANOVA de un factor para DBO5 T AR_F1. DBO5 T AR_F2. DBO5 T EP_F2
Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

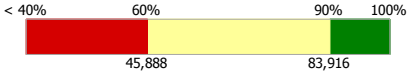


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para DBO5 T AR_F1. DBO5 T AR_F2. DBO5 T EP_F2
Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 83,916, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 45,888.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
45,888	40,0 - 60,0
58,617	60,0 - 81,7
65,377	70,0 - 89,7
73,234	80,0 - 95,6
83,916	90,0 - 99,2

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 73,234, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
DBO5 T AR_F1	18	196,67	77,989	(157,88. 235,45)
DBO5 T AR_F2	12	151,25	43,700	(123,48. 179,02)
DBO5 T EP_F2	13	112,15	43,235	(86,027. 138,28)

ANOVA de un factor para DBO5 T AR_F1. DBO5 T AR_F2. DBO5 T EP_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?



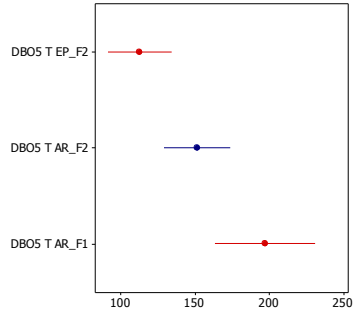
P = 0,002

Las diferencias entre las medias son significativas (p < 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	DBO5 T EP_F2	3
2	DBO5 T AR_F2	
3	DBO5 T AR_F1	1

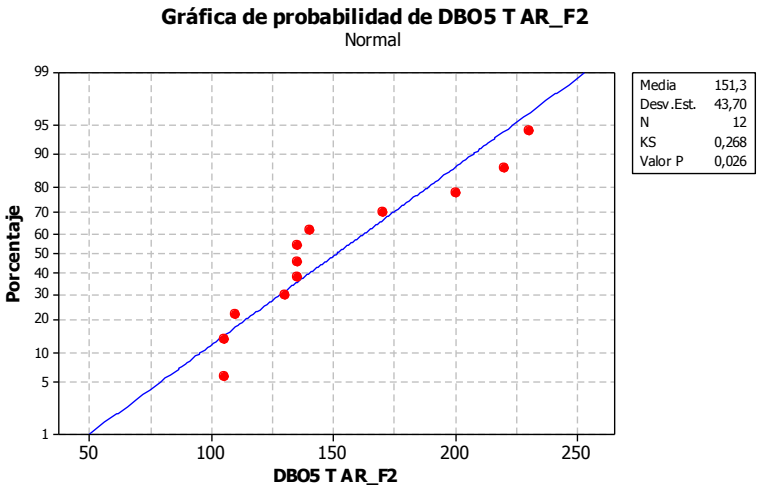
Gráfica de comparación de las medias
Los intervalos en rojo que no se superponen difieren.

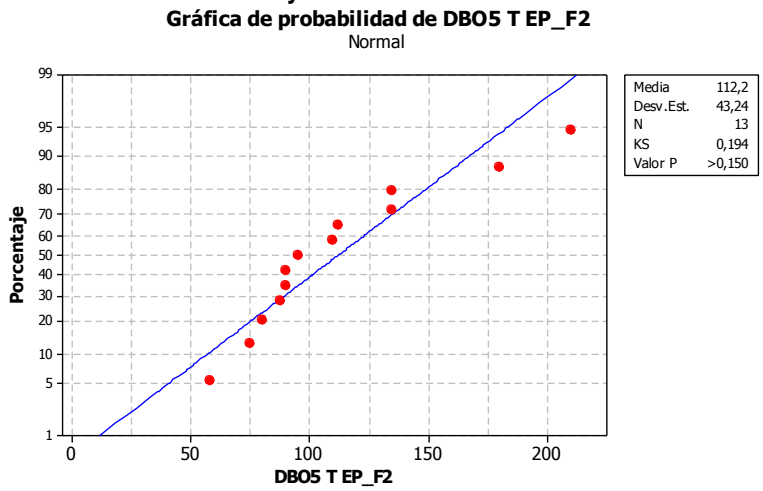


Comentarios

Usted puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05. Utilice la Gráfica de comparación para identificar las medias que difieren. Los intervalos en rojo que no se superponen indican las medias que difieren entre sí. Considere el tamaño de las diferencias para determinar si tienen implicaciones prácticas.

Anexo 8.2. 5 Test de Normalidad para DBO_5 Total del ARd Fase II y EP





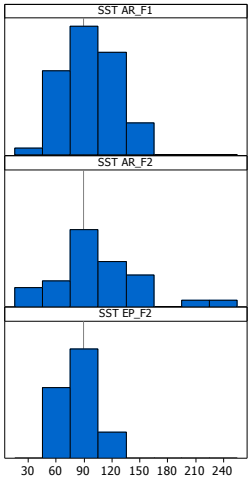
Anexo 8.2. 6 ANOVA SST del ARd Fase I, ARd Fase II y EP

ANOVA de un factor para SST AR_F1. SST AR_F2. SST EP_F2
Tarjeta de informe

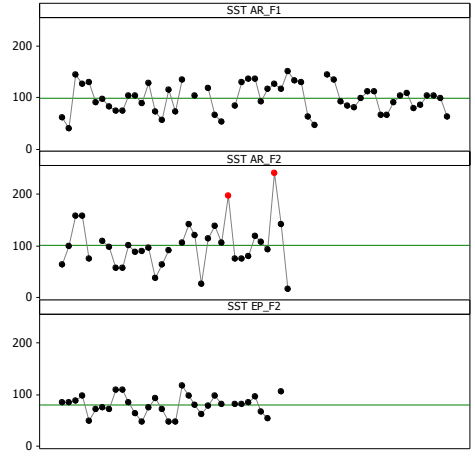
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar diferencias entre las medias.
Normalidad	✓	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

ANOVA de un factor para SST AR_F1. SST AR_F2. SST EP_F2
Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

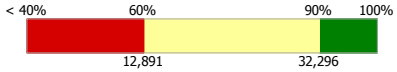


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para SST AR_F1. SST AR_F2. SST EP_F2
Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 32,296, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 12,891.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
12,891	22,9 - 60,0
22,601	60,0 - 98,2
25,190	70,0 - 99,6
28,197	80,0 - 100,0
32,296	90,0 - 100,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 28,197, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
SST AR_F1	55	98,291	28,054	(90,707. 105,87)
SST AR_F2	33	101,76	46,040	(85,432. 118,08)
SST EP_F2	32	80,437	18,972	(73,597. 87,278)

ANOVA de un factor para SST AR_F1. SST AR_F2. SST EP_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

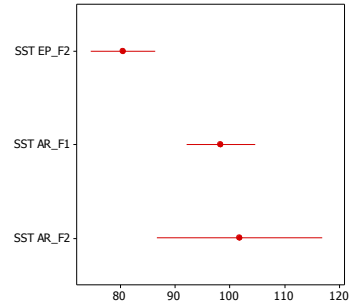


P = 0,001
Las diferencias entre las medias son significativas (p < 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	SST EP_F2	2 3
2	SST AR_F1	1
3	SST AR_F2	1

Gráfica de comparación de las medias
Los intervalos en rojo que no se superponen difieren.



Comentarios

Usted puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05. Utilice la Gráfica de comparación para identificar las medias que difieren. Los intervalos en rojo que no se superponen indican las medias que difieren entre sí. Considere el tamaño de las diferencias para determinar si tienen implicaciones prácticas.

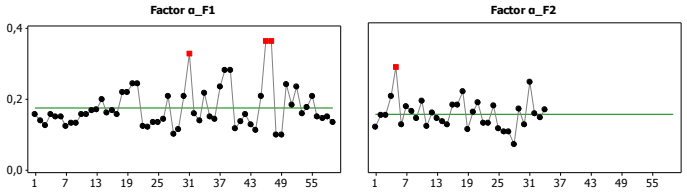
Anexo 8.2. 7 Prueba-t de dos muestras para el Factor α de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de Factor α_F1 y Factor α_F2
Tarjeta de informe

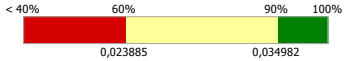
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de Factor α_F1 difiere de Factor α_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,034982. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de Factor α_F1 y Factor α_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 59. 34:
Si hubiera una diferencia de 0,023885 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,034982, tendría una probabilidad de 90,

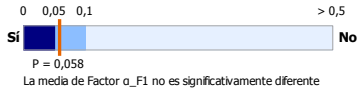
¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 59 y 34?

Diferencia	Potencia
0,023885	60,0
0,026810	70,0
0,030234	80,0
0,034982	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,030234, considere aumentar los tamaños de las muestras.

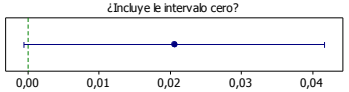
Prueba t de 2 muestras para la media de Factor α_F1 y Factor α_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

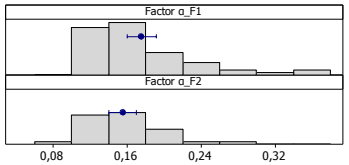


La media de Factor α_F1 no es significativamente diferente de la media de Factor α_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	Factor α_F1	Factor α_F2
Tamaño de la muestra	59	34
Media	0,17577	0,15523
IC de 95%	(0,1600. 0,1915)	(0,14055. 0,16991)
Desviación estándar	0,060414	0,042069

Diferencia entre medias*	0,020545
IC de 95%	(-0,0006689. 0,041759)

* La diferencia se define como Factor α_F1 - Factor α_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,00066892 y 0,041759.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

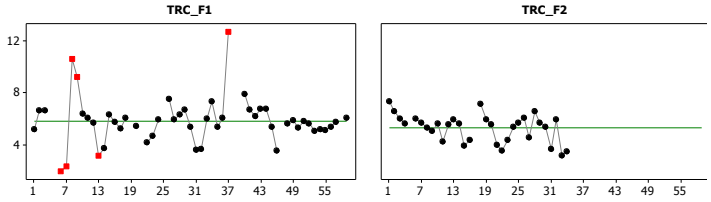
Anexo 8.2. 8 Prueba-t de dos muestras para el TRC de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de TRC_F1 y TRC_F2
Tarjeta de informe

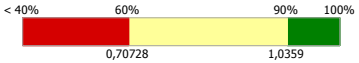
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra sc suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de TRC_F1 difiere de TRC_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 1,0359. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestra tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente cc varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de TRC_F1 y TRC_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 50. 32:
Si hubiera una diferencia de 0,70728 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 1,0359, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 50 y 32?

Diferencia	Potencia
0,70728	60,0
0,79392	70,0
0,89531	80,0
1,0359	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,89531, considere aumentar los tamaños de las muestras.

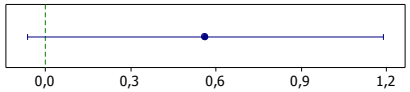
Prueba t de 2 muestras para la media de TRC_F1 y TRC_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

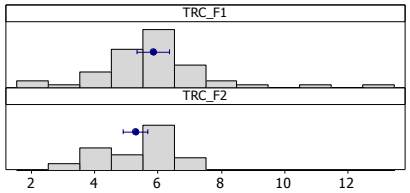


La media de TRC_F1 no es significativamente diferente de la media de TRC_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	TRC_F1	TRC_F
Tamaño de la muestra	50	3:
Media	5,8454	5,282:
IC de 95%	(5,335. 6,356)	(4,8999. 5,6647
Desviación estándar	1,7961	1,060!

Diferencia entre medias*	0,56307
IC de 95%	(-0,065314. 1,1915)

* La diferencia se define como TRC_F1 - TRC_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,065314 y 1,1915.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

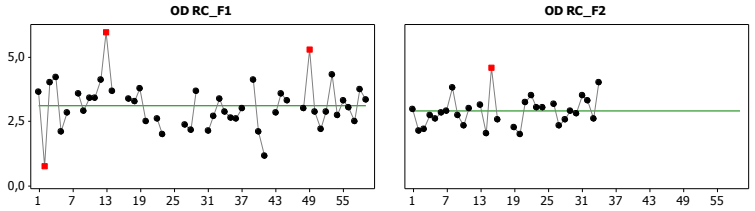
Anexo 8.2. 9 Prueba-t de dos muestras para el OD del RC de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de OD RC_F1 y OD RC_F2
Tarjeta de informe

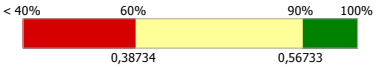
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de OD RC_F1 difiere de OD RC_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,56733. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de OD RC_F1 y OD RC_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 47. 30:
Si hubiera una diferencia de 0,38734 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,56733, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 47 y 30?

Diferencia	Potencia
0,38734	60,0
0,43479	70,0
0,49032	80,0
0,56733	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,49032, considere aumentar los tamaños de las muestras.

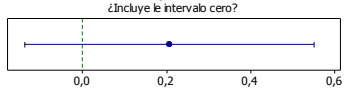
Prueba t de 2 muestras para la media de OD RC_F1 y OD RC_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

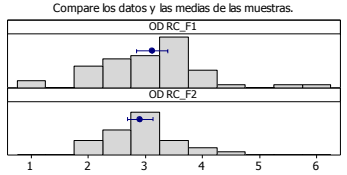


La media de OD RC_F1 no es significativamente diferente de la media de OD RC_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye el intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	OD RC_F1	OD RC_F2
Tamaño de la muestra	47	30
Media	3,1145	2,9077
IC de 95%	(2,844. 3,385)	(2,6854. 3,1299)
Desviación estándar	0,92077	0,59519

Diferencia entre medias*	0,20680
IC de 95%	(-0,13744. 0,55104)

* La diferencia se define como OD RC_F1 - OD RC_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,13744 y 0,55104.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

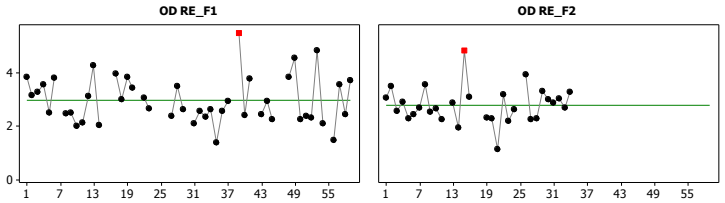
Anexo 8.2. 10 Prueba-t de dos muestras para el OD del RE de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de OD RE_F1 y OD RE_F2
Tarjeta de informe

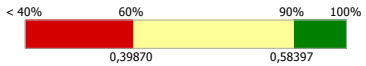
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de OD RE_F1 difiere de OD RE_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,58397. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de OD RE_F1 y OD RE_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 46. 30:
Si hubiera una diferencia de 0,39870 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,58397, tendría una probabilidad de 90,

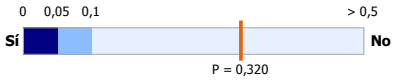
¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 46 y 30?

Diferencia	Potencia
0,39870	60,0
0,44754	70,0
0,50470	80,0
0,58397	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,50470, considere aumentar los tamaños de las muestras.

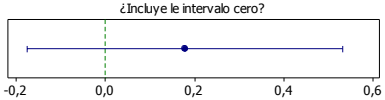
Prueba t de 2 muestras para la media de OD RE_F1 y OD RE_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

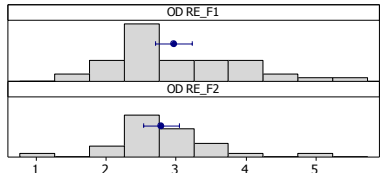


La media de OD RE_F1 no es significativamente diferente de la media de OD RE_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	OD RE_F1	OD RE_F2
Tamaño de la muestra	46	30
Media	2,9667	2,7887
IC de 95%	(2,709. 3,224)	(2,5365. 3,0409)
Desviación estándar	0,86798	0,67541

Diferencia entre medias*	0,17807
IC de 95%	(-0,17629. 0,53243)

* La diferencia se define como OD RE_F1 - OD RE_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,17629 y 0,53243.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

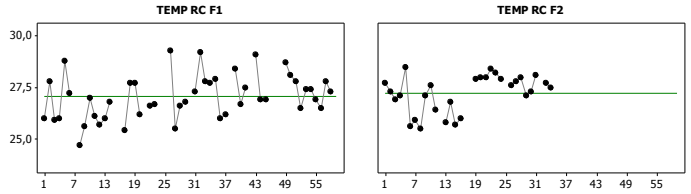
Anexo 8.2. 11 Prueba-t de dos muestras para la Temperatura del licor mixto del RC de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de TEMP RC F1 y TEMP RC F2
Tarjeta de informe

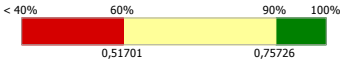
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	i	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de TEMP RC F1 difiere de TEMP RC F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,75726. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	i	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de TEMP RC F1 y TEMP RC F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 46. 29:
Si hubiera una diferencia de 0,51701 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,75726, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 46 y 29?

Diferencia	Potencia
0,51701	60,0
0,58035	70,0
0,65447	80,0
0,75726	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,65447, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Prueba t de 2 muestras para la media de TEMP RC F1 y TEMP RC F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?



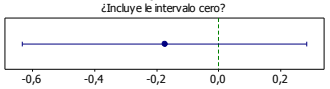
La media de TEMP RC F1 no es significativamente diferente de la media de TEMP RC F2 (p > 0,05).

Estadísticas	TEMP RC F1	TEMP RC F2
Tamaño de la muestra	46	29
Media	27,046	27,221
IC de 95%	(26,73. 27,36)	(26,877. 27,564)
Desviación estándar	1,0701	0,90292

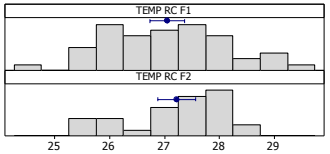
Diferencia entre medias*	-0,17504
IC de 95%	(-0,63472. 0,28464)

* La diferencia se define como TEMP RC F1 - TEMP RC F2.

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,63472 y 0,28464.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

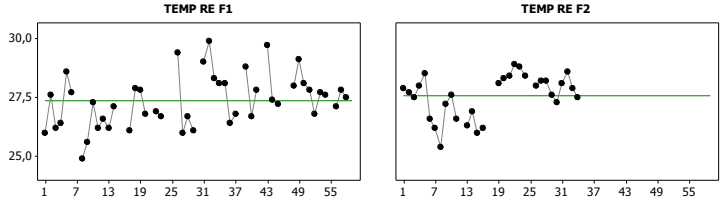
Anexo 8.2. 12 Prueba-t de dos muestras para la Temperatura del licor mixto del RE de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de TEMP RE F1 y TEMP RE F2
Tarjeta de informe

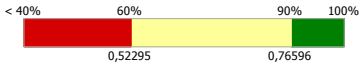
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	i	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de TEMP RE F1 difiere de TEMP RE F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,76596. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	i	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de TEMP RE F1 y TEMP RE F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 46. 30:
Si hubiera una diferencia de 0,52295 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,76596, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 46 y 30?

Diferencia	Potencia
0,52295	60,0
0,58701	70,0
0,66198	80,0
0,76596	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,66198, considere aumentar los tamaños de las muestras.

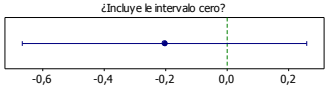
Prueba t de 2 muestras para la media de TEMP RE F1 y TEMP RE F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

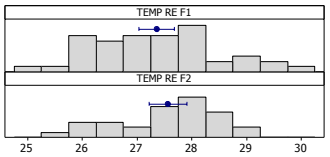


La media de TEMP RE F1 no es significativamente diferente de la media de TEMP RE F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	TEMP RE F1	TEMP RE F2
Tamaño de la muestra	46	30
Media	27,359	27,563
IC de 95%	(27,03. 27,69)	(27,222. 27,904)
Desviación estándar	1,1045	0,91293

Diferencia entre medias* -0,20464
IC de 95% (-0,66950. 0,26023)
* La diferencia se define como TEMP RE F1 - TEMP RE F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,66950 y 0,26023.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

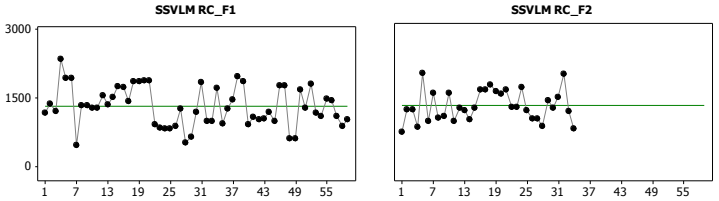
Anexo 8.2. 13 Prueba-t de dos muestras para el SSVLM RC de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de SSVLM RC_F1 y SSVLM RC_F2
Tarjeta de informe

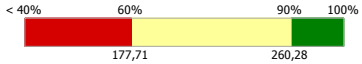
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	i	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de SSVLM RC_F1 difiere de SSVLM RC_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 260,28. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	i	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de SSVLM RC_F1 y SSVLM RC_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 59. 34:
Si hubiera una diferencia de 177,71 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 260,28, tendría una probabilidad de 90,

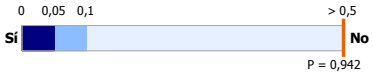
¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 59 y 34?

Diferencia	Potencia
177,71	60,0
199,47	70,0
224,95	80,0
260,28	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 224,95, considere aumentar los tamaños de las muestras.

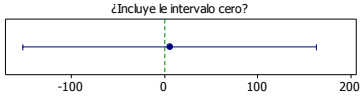
Prueba t de 2 muestras para la media de SSVLM RC_F1 y SSVLM RC_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

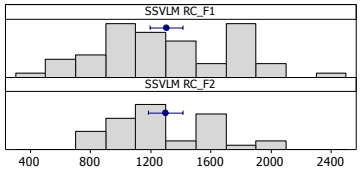


La media de SSVLM RC_F1 no es significativamente diferente de la media de SSVLM RC_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	SSVLM RC_F1	SSVLM RC_F2
Tamaño de la muestra	59	34
Media	1305,8	1300
IC de 95%	(1195. 1417)	(1184,8. 1415,2)
Desviación estándar	426,94	330,31

Diferencia entre medias*	5,8186
IC de 95%	(-152,03. 163,67)

* La diferencia se define como SSVLM RC_F1 - SSVLM RC_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -152,03 y 163,67.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

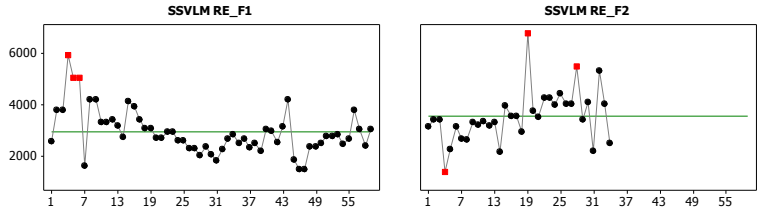
Anexo 8.2. 14 Prueba-t de dos muestras para el SSVLM RE de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de SSVLM RE_F1 y SSVLM RE_F2
Tarjeta de informe

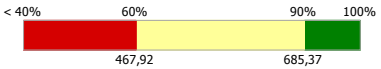
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar una diferencia entre las medias.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de SSVLM RE_F1 y SSVLM RE_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 59. 34:
Si hubiera una diferencia de 467,92 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 685,37, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 59 y 34?

Diferencia	Potencia
467,92	60,0
525,24	70,0
592,33	80,0
685,37	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 592,33, considere aumentar los tamaños de las muestras.

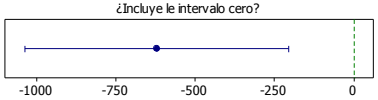
Prueba t de 2 muestras para la media de SSVLM RE_F1 y SSVLM RE_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

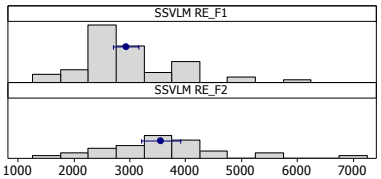


P = 0,004
La media de SSVLM RE_F1 es significativamente diferente de la media de SSVLM RE_F2 (p < 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	SSVLM RE_F1	SSVLM RE_F2
Tamaño de la muestra	59	34
Media	2935,2	3557,1
IC de 95%	(2710. 3160)	(3200,8. 3913,3)
Desviación estándar	862,68	1021,0

Diferencia entre medias*	-621,87
IC de 95%	(-1038,1. -205,62)

* La diferencia se define como SSVLM RE_F1 - SSVLM RE_F2.

Comentarios

-- Prueba: Usted puede concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -1038,1 y -205,62.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

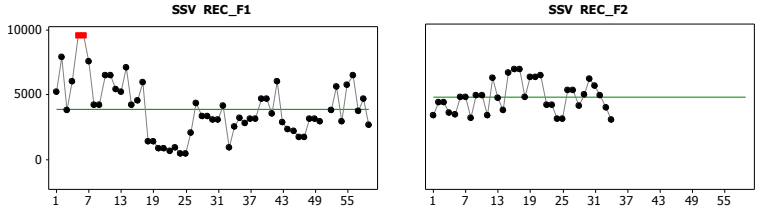
Anexo 8.2. 15 Prueba-t de dos muestras para el SSVLM en la recirculación de lodo de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de SSV REC_F1 y SSV REC_F2
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar una diferencia entre las medias.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de SSV REC_F1 y SSV REC_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 58. 34:
Si hubiera una diferencia de 781,47 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 1144,6, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 58 y 34?

Diferencia	Potencia
781,47	60,0
877,19	70,0
989,21	80,0
1144,6	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 989,21, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Prueba t de 2 muestras para la media de SSV REC_F1 y SSV REC_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?



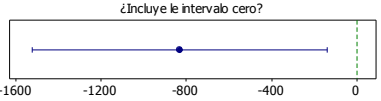
P = 0,020
La media de SSV REC_F1 es significativamente diferente de la media de SSV REC_F2 (p < 0,05).

Estadísticas	SSV REC_F1	SSV REC_F2
Tamaño de la muestra	58	34
Media	3879,0	4709,7
IC de 95%	(3310. 4448)	(4296,6. 5122,8)
Desviación estándar	2164,5	1183,9

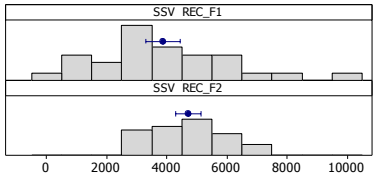
Diferencia entre medias*	-830,70
IC de 95%	(-1524,7. -136,66)

* La diferencia se define como SSV REC_F1 - SSV REC_F2.

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Comentarios

-- Prueba: Usted puede concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -1524,7 y -136,66.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

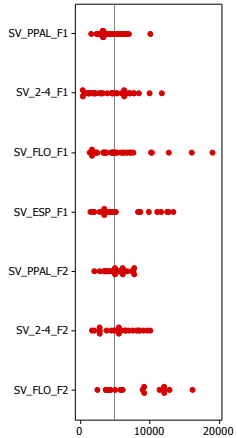
Anexo 8.2. 16 ANOVA SV en el lodo de purga de la fase i y fase II

ANOVA de un factor para SV_PPAL_F1. SV_2-4_F1. SV_FLO_F1. SV_ESP_F1.... Tarjeta de informe

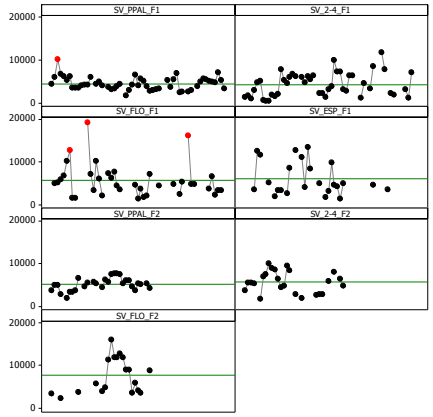
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar diferencias entre las medias.
Normalidad	✓	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

ANOVA de un factor para SV_PPAL_F1. SV_2-4_F1. SV_FLO_F1. SV_ESP_F1.... Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

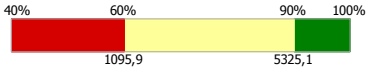


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para SV_PPAL_F1. SV_2-4_F1. SV_FLO_F1. SV_ESP_F1.... Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 5325,1, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 1095,9.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
1095,9	8,3 - 60,0
3831,8	60,0 - 100,0
4233,6	70,0 - 100,0
4697,1	80,0 - 100,0
5325,1	90,0 - 100,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 4697,1, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
SV_PPAL_F1	52	4391,6	1507,3	(3972,0. 4811,3)
SV_2-4_F1	46	4206,5	2740,6	(3392,7. 5020,4)
SV_FLO_F1	37	5649,3	3885,9	(4353,7. 6945,0)
SV_ESP_F1	24	6082,8	3837,9	(4462,2. 7703,5)
SV_PPAL_F2	29	5186,3	1476,1	(4624,9. 5747,8)
SV_2-4_F2	24	5685,1	2503,7	(4627,9. 6742,3)
SV_FLO_F2	19	7712,6	4091,0	(5740,7. 9684,4)

ANOVA de un factor para SV_PPAL_F1. SV_2-4_F1. SV_FLO_F1. SV_ESP_F1.... Informe de resumen

¿Difieren las medias?



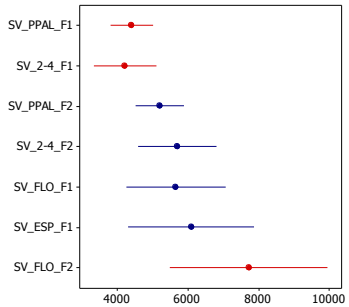
P = 0,002

Las diferencias entre las medias son significativas (p < 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	SV_PPAL_F1	7
2	SV_2-4_F1	7
3	SV_PPAL_F2	
4	SV_2-4_F2	
5	SV_FLO_F1	
6	SV_ESP_F1	
7	SV_FLO_F2	1 2

Gráfica de comparación de las medias
Los intervalos en rojo que no se superponen difieren.



Comentarios

Usted puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05. Utilice la Gráfica de comparación para identificar las medias que difieren. Los intervalos en rojo que no se superponen indican las medias que difieren entre sí. Considere el tamaño de las diferencias para determinar si tienen implicaciones prácticas.

Universidad del Valle

EIDENAR

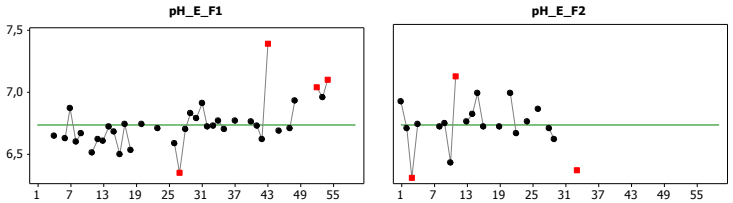
Anexo 8.2. 17 Prueba-t de dos muestras para pH del ES de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de pH_E_F1 y pH_E_F2
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de pH_E_F1 difiere de pH_E_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,17974. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de pH_E_F1 y pH_E_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 36. 20:
Si hubiera una diferencia de 0,12269 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,17974, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 36 y 20?

Diferencia	Potencia
0,12269	60,0
0,13773	70,0
0,15533	80,0
0,17974	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,15533, considere aumentar los tamaños de las muestras.

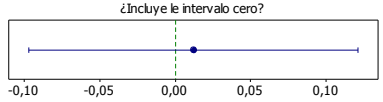
Prueba t de 2 muestras para la media de pH_E_F1 y pH_E_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

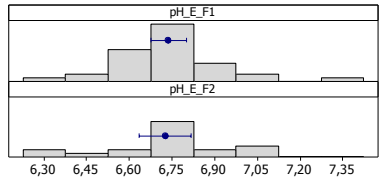


La media de pH_E_F1 no es significativamente diferente de la media de pH_E_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	pH_E_F1	pH_E_F2
Tamaño de la muestra	36	20
Media	6,7381	6,726
IC de 95%	(6,675. 6,801)	(6,6335. 6,8185)
Desviación estándar	0,18645	0,19755

Diferencia entre medias* 0,012056
IC de 95% (-0,097377. 0,12149)
* La diferencia se define como pH_E_F1 - pH_E_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,097377 y 0,12149.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

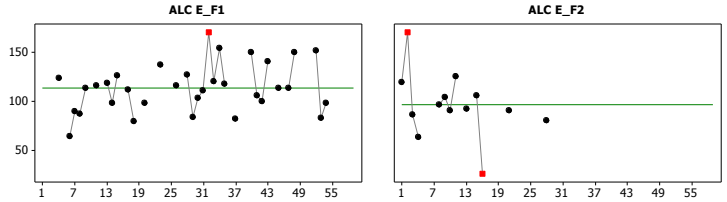
Anexo 8.2. 18 Prueba-t de dos muestras para la Alcalinidad Total del ES de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de ALC E_F1 y ALC E_F2
Tarjeta de informe

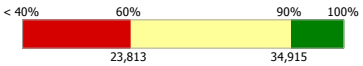
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	⚠	Debido a que el tamaño de la muestra de ALC E_F2 es menor que 15, la normalidad puede ser un problema. Si los datos no están distribuidos normalmente, el valor p puede ser inexacto con muestras pequeñas. Además, los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados de la prueba. Dado que la normalidad no se puede verificar de forma confiable con muestras pequeñas, usted debería interpretar los resultados de la prueba con precaución.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de ALC E_F1 difiere de ALC E_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 34,915. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.

Prueba t de 2 muestras para la media de ALC E_F1 y ALC E_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 33. 13:
Si hubiera una diferencia de 23,813 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 34,915, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 33 y 13?

Diferencia	Potencia
23,813	60,0
26,738	70,0
30,162	80,0
34,915	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 30,162, considere aumentar los tamaños de las muestras.

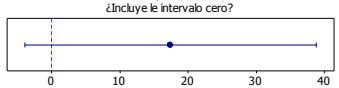
Prueba t de 2 muestras para la media de ALC E_F1 y ALC E_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

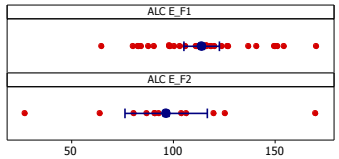


P = 0,104
La media de ALC E_F1 no es significativamente diferente de la media de ALC E_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	ALC E_F1	ALC E_F2
Tamaño de la muestra	33	13
Media	113,88	96,435
IC de 95%	(105,2. 122,6)	(76,354. 116,52)
Desviación estándar	24,576	33,231
Diferencia entre medias*		17,447
IC de 95%		(-3,9905. 38,885)

* La diferencia se define como ALC E_F1 - ALC E_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -3,9905 y 38,885.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

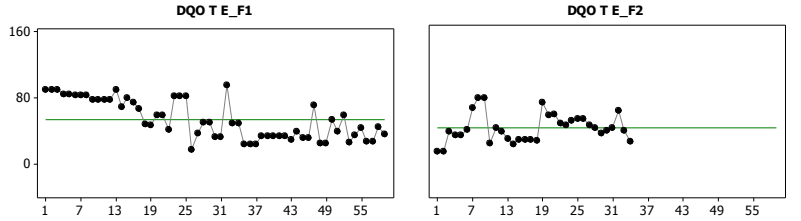
Anexo 8.2. 19 Prueba-t de dos muestras para la DQO total del ES de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de DQO T E_F1 y DQO T E_F2
Tarjeta de informe

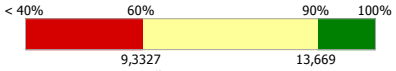
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar una diferencia entre las medias.
Varianza igual	i	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de DQO T E_F1 y DQO T E_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 59. 34:
Si hubiera una diferencia de 9,3327 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 13,669, tendría una probabilidad de 90,

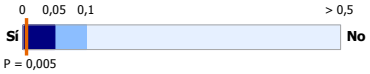
¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 59 y 34?

Diferencia	Potencia
9,3327	60,0
10,476	70,0
11,814	80,0
13,669	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 11,814, considere aumentar los tamaños de las muestras.

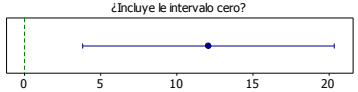
Prueba t de 2 muestras para la media de DQO T E_F1 y DQO T E_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

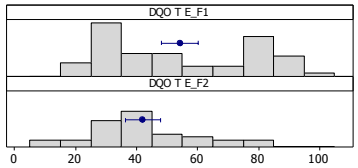


La media de DQO T E_F1 es significativamente diferente de la media de DQO T E_F2 (p < 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	DQO T E_F1	DQO T E_F2
Tamaño de la muestra	59	34
Media	54,200	42,110
IC de 95%	(48,07. 60,33)	(36,347. 47,874)
Desviación estándar	23,507	16,518

Diferencia entre medias*	12,089
IC de 95%	(3,8003. 20,378)

* La diferencia se define como DQO T E_F1 - DQO T E_F2.

Comentarios

-- Prueba: Usted puede concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre 3,8003 y 20,378.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

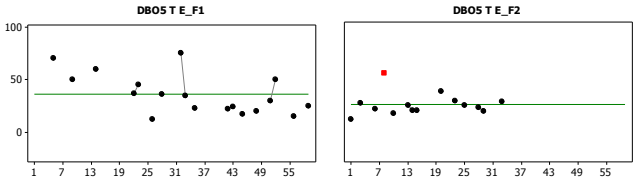
Anexo 8.2. 20 Prueba-t de dos muestras para la DBO_5 total del ES de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de DBO5 T E_F1 y DBO5 T E_F2
Tarjeta de informe

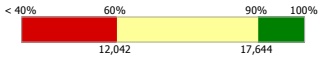
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Un punto de los datos (fila 8) es poco común en comparación con los otros en DBO5 T E_F2. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Corrija cualquier error d ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	⚠	Debido a que el tamaño de la muestra de DBO5 T E_F2 es menor que 15, la normalidad puede ser un problema. Si los datos no están distribuidos normalmente, el valor p puede ser inexacto con muestras pequeñas. Además, los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados de la prueba. Dado que la normalidad no se puede verificar de forma confiable con muestras pequeñas, usted debería interpretar los resultados de la prueba con precaución.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de DBO5 T E_F1 difiere de DBO5 T E_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeñ De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 17,644. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.

Prueba t de 2 muestras para la media de DBO5 T E_F1 y DBO5 T E_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 18. 14:
Si hubiera una diferencia de 12,042 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 17,644, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 18 y 14?

Diferencia	Potencia
12,042	60,0
13,518	70,0
15,247	80,0
17,644	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 15,247, considere aumentar los tamaños de las muestras.

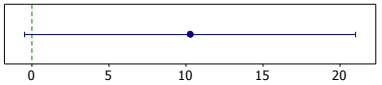
Prueba t de 2 muestras para la media de DBO5 T E_F1 y DBO5 T E_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

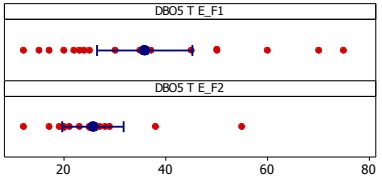


P = 0,061
La media de DBO5 T E_F1 no es significativamente diferente de la media de DBO5 T E_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	DBO5 T E_F1	DBO5 T E_I
Tamaño de la muestra	18	
Media	35,889	25,6
IC de 95%	(26,52. 45,25)	(19,585. 31,70
Desviación estándar	18,830	10,4
Diferencia entre medias*		10,246
IC de 95%		(-0,52607. 21,018)

* La diferencia se define como DBO5 T E_F1 - DBO5 T E_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,52607 y 21,018.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

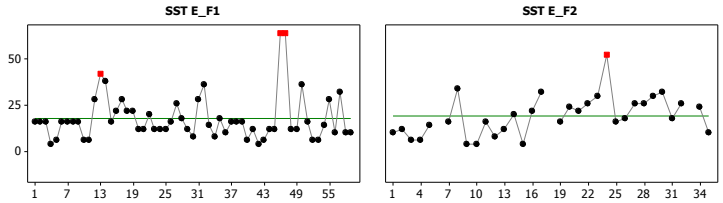
Anexo 8.2. 21 Prueba-t de dos muestras para SST total del ES de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de SST E_F1 y SST E_F2
Tarjeta de informe

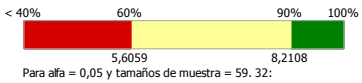
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de SST E_F1 difiere de SST E_F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 8,2108. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Varianza igual	ℹ	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de SST E_F1 y SST E_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 59. 32:
Si hubiera una diferencia de 5,6059 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 8,2108, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 59 y 32?

Diferencia	Potencia
5,6059	60,0
6,2926	70,0
7,0962	80,0
8,2108	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 7,0962, considere aumentar los tamaños de las muestras.

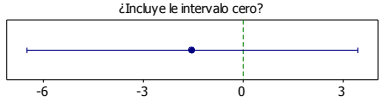
Prueba t de 2 muestras para la media de SST E_F1 y SST E_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

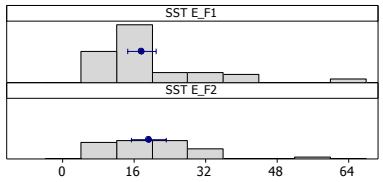


La media de SST E_F1 no es significativamente diferente de la media de SST E_F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	SST E_F1	SST E_F2
Tamaño de la muestra	59	32
Media	17,729	19,25
IC de 95%	(14,50. 20,96)	(15,357. 23,143)
Desviación estándar	12,387	10,797

Diferencia entre medias*	-1,5212
IC de 95%	(-6,5036. 3,4612)

* La diferencia se define como SST E_F1 - SST E_F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -6,5036 y 3,4612.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

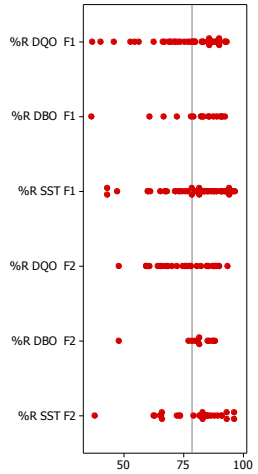
Anexo 8.2. 22 ANOVA Porcentaje de Reducción de DQO, DBO_5 y SST en el SLAEC en la Fase I y Fase II

ANOVA de un factor para %R DQO F1. %R DBO F1. %R SST F1. %R DQO F2.... Tarjeta de informe

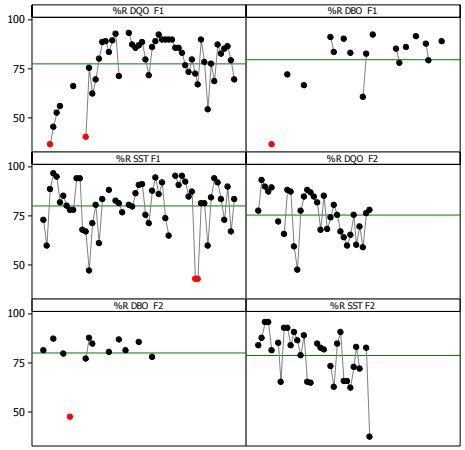
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que que hay diferencias entre las medias. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. El Informe de potencia muestra que, de acuerdo con los tamaños de sus muestras y el nivel de significancia, usted tiene por lo menos una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 19,9 entre cualesquiera dos medias. Algunos profesionales consideran que un 80% de probabilidad de detección es suficiente. Si esto se aplica a su caso, usted puede concluir que no es probable que existan diferencias de 19,9 o mayores. Para determinar qué tan grandes deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Normalidad	⚠	Debido a que algunos tamaños de muestra son menores que 15, la normalidad puede ser un problema. Si los datos no están distribuidos normalmente, el valor p puede ser inexacto con muestras pequeñas. Además, los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados de la prueba. Dado que la normalidad no se puede verificar de forma confiable con muestras pequeñas, usted debería interpretar los resultados de la prueba con precaución.

ANOVA de un factor para %R DQO F1. %R DBO F1. %R SST F1. %R DQO F2.... Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

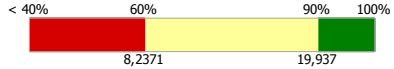


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para %R DQO F1. %R DBO F1. %R SST F1. %R DQO F2.... Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 19,937, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 8,2371.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
8,2371	22,4 - 60,0
14,175	60,0 - 98,9
15,718	70,0 - 99,8
17,507	80,0 - 100,0
19,937	90,0 - 100,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 17,507, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
%R DQO F1	49	77,595	14,000	(73,574. 81,616)
%R DBO F1	17	79,681	14,274	(72,342. 87,020)
%R SST F1	55	80,416	13,099	(76,875. 83,957)
%R DQO F2	33	75,608	11,440	(71,552. 79,665)
%R DBO F2	12	80,148	10,903	(73,221. 87,076)
%R SST F2	31	79,055	12,941	(74,308. 83,802)

ANOVA de un factor para %R DQO F1. %R DBO F1. %R SST F1. %R DQO F2.... Informe de resumen

¿Difieren las medias?

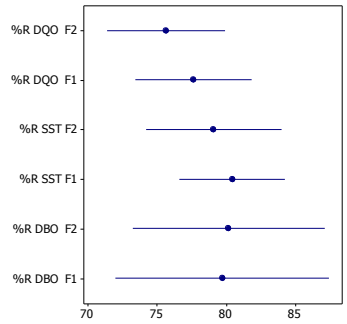


Las diferencias entre las medias no son significativas (p > 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	%R DQO F2	
2	%R DQO F1	
3	%R SST F2	
4	%R SST F1	No se identificó ninguno
5	%R DBO F2	
6	%R DBO F1	

Gráfica de comparación de las medias



Comentarios

Usted no puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05.

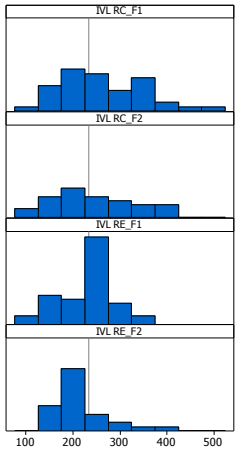
Anexo 8.2. 23 ANOVA para el IVL del licor mixto de RC y RE de la Fase I y Fase II

ANOVA de un factor para IVL RC_F1. IVL RC_F2. IVL RE_F1. IVL RE_F2
Tarjeta de informe

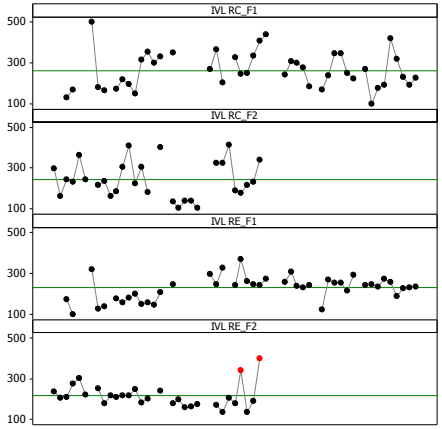
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	⚠	Algunos de los puntos de los datos son poco comunes en comparación con los otros puntos de la misma muestra. Debido a que los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados, usted debería intentar identificar la causa de su naturaleza poco común. Estos puntos están marcados en rojo en el Informe de diagnóstico. Usted puede colocar el cursor del ratón sobre un punto o utilizar la característica de destacado de Minitab para identificar la fila de la hoja de trabajo. Corrija cualquier error de ingreso de datos o de medición. Considere eliminar los datos que estén asociados con causas especiales y repetir el análisis.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que que hay diferencias entre las medias. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. El Informe de potencia muestra que, de acuerdo con los tamaños de sus muestras y el nivel de significancia, usted tiene por lo menos una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 83,9 entre cualesquiera dos medias. Algunos profesionales consideran que un 80% de probabilidad de detección es suficiente. Si esto se aplica a su caso, usted puede concluir que no es probable que existan diferencias de 83,9 o mayores. Para determinar qué tan grandes deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.
Normalidad	✓	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

ANOVA de un factor para IVL RC_F1. IVL RC_F2. IVL RE_F1. IVL RE_F2
Informe de diagnóstico

Distribución de los datos
Compare la ubicación y la dispersión.

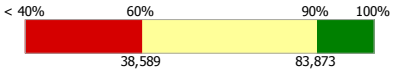


Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



ANOVA de un factor para IVL RC_F1. IVL RC_F2. IVL RE_F1. IVL RE_F2
Informe sobre potencia

Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



De acuerdo con sus muestras y el nivel de significancia (0,05), usted tiene una probabilidad mínima de 90% de detectar una diferencia de 83,873, y una probabilidad máxima de 60% de detectar una diferencia de 38,589.

¿Qué diferencia puede detectar con los tamaños de sus muestras?

Diferencia	Potencia
38,589	27,6 - 60,0
59,499	60,0 - 94,9
66,012	70,0 - 98,2
73,561	80,0 - 99,6
83,873	90,0 - 100,0

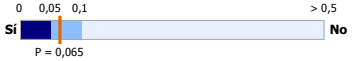
La potencia es una función de los tamaños de las muestras y de las desviaciones estándar. Para detectar diferencias menores que 73,561, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Estadísticas

Muestra	Tamaño de la muestra	Media	Desviación estándar	IC individual 95% para media
IVL RC_F1	43	262,88	89,838	(235,23. 290,53)
IVL RC_F2	29	242,85	90,422	(208,45. 277,24)
IVL RE_F1	43	229,53	59,121	(211,34. 247,73)
IVL RE_F2	29	216,28	57,755	(194,31. 238,25)

ANOVA de un factor para IVL RC_F1. IVL RC_F2. IVL RE_F1. IVL RE_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?



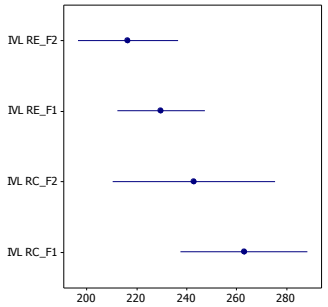
P = 0,065

Las diferencias entre las medias no son significativas (p > 0,05).

¿Cuáles medias difieren?

#	Muestra	Difiere de
1	IVL RE_F2	
2	IVL RE_F1	
3	IVL RC_F2	No se identificó ninguno
4	IVL RC_F1	

Gráfica de comparación de las medias



Comentarios

Usted no puede concluir que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0,05.

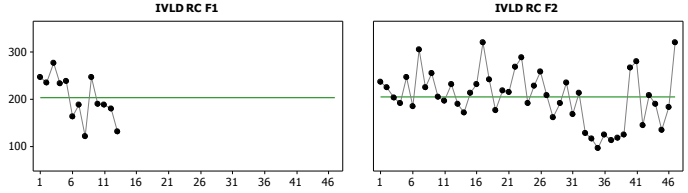
Anexo 8.2. 24 Prueba-t de dos muestras para IVLD de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de IVLD RC F1 y IVLD RC F2
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	!	Debido a que el tamaño de la muestra de IVLD RC F1 es menor que 15, la normalidad puede ser un problema. Si los datos no están distribuidos normalmente, el valor p puede ser inexacto con muestras pequeñas. Dado que la normalidad no se puede verificar de forma confiable con muestras pequeñas, usted debería interpretar los resultados de la prueba con precaución.
Tamaño de la muestra	i	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de IVLD RC F1 difiere de IVLD RC F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 52,256. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.

Prueba t de 2 muestras para la media de IVLD RC F1 y IVLD RC F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 13. 47:
Si hubiera una diferencia de 35,655 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 52,256, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 13 y 47?

Diferencia	Potencia
35,655	60,0
40,029	70,0
45,151	80,0
52,256	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 45,151, considere aumentar los tamaños de las muestras.

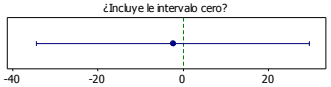
Prueba t de 2 muestras para la media de IVLD RC F1 y IVLD RC F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

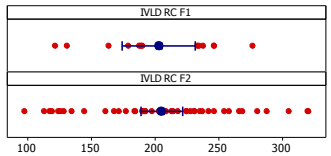


La media de IVLD RC F1 no es significativamente diferente de la media de IVLD RC F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	IVLD RC F1	IVLD RC F2
Tamaño de la muestra	13	47
Media	203,04	205,45
IC de 95%	(174,4. 231,6)	(189,25. 221,66)
Desviación estándar	47,330	55,186

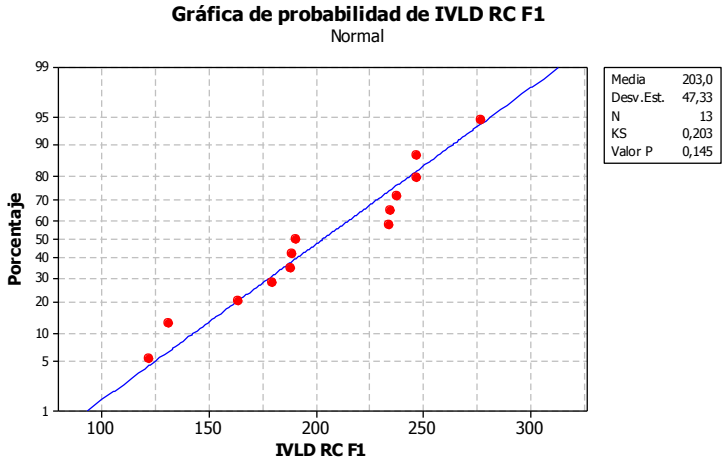
Diferencia entre medias*	-2,4166
IC de 95%	(-34,440. 29,607)

* La diferencia se define como IVLD RC F1 - IVLD RC F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -34,440 y 29,607.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

Anexo 8.2. 25 Test de Normalidad para el IVLD del RC Fase I y Fase II



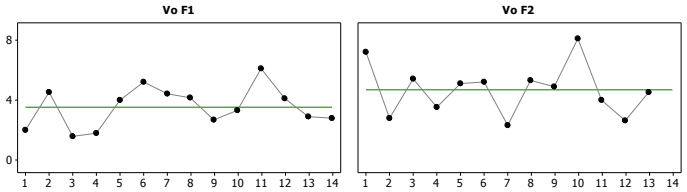
Anexo 8.2. 26 Prueba-t de dos muestras para la constante de Vesilind Vo de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de Vo F1 y Vo F2
Tarjeta de informe

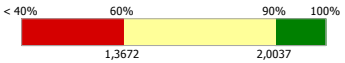
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	⚠	Debido a que los tamaños de las muestras son menores que 15, la normalidad puede ser un problema. Si los datos no están distribuidos normalmente, el valor p puede ser inexacto con muestras pequeñas. Dado que la normalidad no se puede verificar de forma confiable con muestras pequeñas, usted debería interpretar los resultados de la prueba con precaución.
Tamaño de la muestra	ℹ	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de Vo F1 difiere de Vo F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 2,0037. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.

Prueba t de 2 muestras para la media de Vo F1 y Vo F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 14. 13:
Si hubiera una diferencia de 1,3672 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 2,0037, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 14 y 13?

Diferencia	Potencia
1,3672	60,0
1,5349	70,0
1,7313	80,0
2,0037	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 1,7313, considere aumentar los tamaños de las muestras.

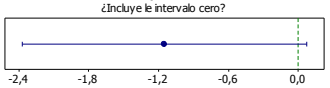
Prueba t de 2 muestras para la media de Vo F1 y Vo F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

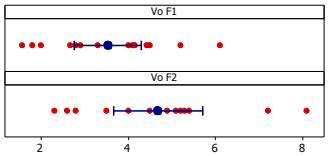


La media de Vo F1 no es significativamente diferente de la media de Vo F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	Vo F1	Vo F2
Tamaño de la muestra	14	13
Media	3,5357	4,6846
IC de 95%	(2,768. 4,304)	(3,6547. 5,7145)
Desviación estándar	1,3299	1,7043

Diferencia entre medias* -1,1489
IC de 95% (-2,3754. 0,077633)
* La diferencia se define como Vo F1 - Vo F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -2,3754 y 0,077633.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

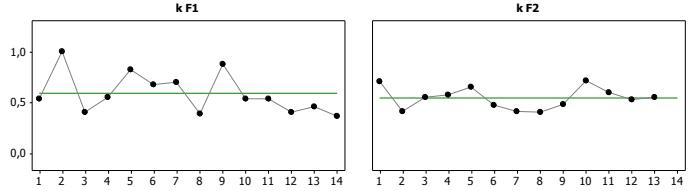
Anexo 8.2. 27 Prueba-t de dos muestras para la constante de Vesilind k de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de k F1 y k F2
Tarjeta de informe

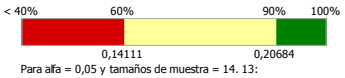
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	!	Debido a que los tamaños de las muestras son menores que 15, la normalidad puede ser un problema. Si los datos no están distribuidos normalmente, el valor p puede ser inexacto con muestras pequeñas. Dado que la normalidad no se puede verificar de forma confiable con muestras pequeñas, usted debería interpretar los resultados de la prueba con precaución.
Tamaño de la muestra	i	Sus datos no proveen suficiente evidencia para concluir que la media de k F1 difiere de k F2. Esto podría deberse a que los tamaños de las muestras son demasiado pequeños. De acuerdo con los tamaños de sus muestras, las desviaciones estándar y el nivel de significancia, usted tendría una probabilidad de 90% de detectar una diferencia de 0,20684. Para determinar qué tan grande deben ser sus muestras para detectar una diferencia que tenga implicaciones prácticas, repita el análisis e ingrese un valor para la diferencia.

Prueba t de 2 muestras para la media de k F1 y k F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 14. 13:
Si hubiera una diferencia de 0,14111 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,20684, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 14 y 13?

Diferencia	Potencia
0,14111	60,0
0,15842	70,0
0,17870	80,0
0,20684	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,17870, considere aumentar los tamaños de las muestras.

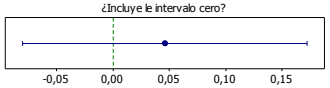
Prueba t de 2 muestras para la media de k F1 y k F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

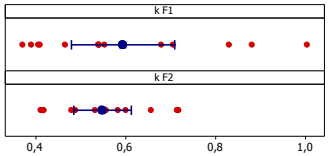


La media de k F1 no es significativamente diferente de la media de k F2 (p > 0,05).

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Estadísticas	k F1	k F2
Tamaño de la muestra	14	13
Media	0,59378	0,54792
IC de 95%	(0,4791. 0,7085)	(0,48390. 0,61195)
Desviación estándar	0,19869	0,10595

Diferencia entre medias* 0,045855
IC de 95% (-0,080744. 0,17245)
* La diferencia se define como k F1 - k F2.

Comentarios

-- Prueba: No existe suficiente evidencia para concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,080744 y 0,17245.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.

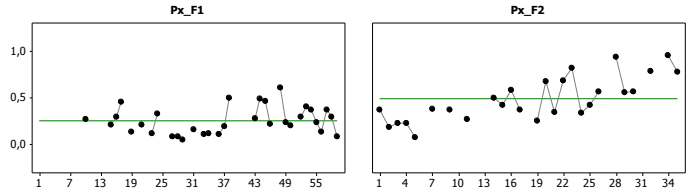
Anexo 8.2. 28 Prueba-t de dos muestras para el coeficiente de producción de lodos (Px) de la Fase I y Fase II

Prueba t de 2 muestras para la media de Px_F1 y Px_F2
Tarjeta de informe

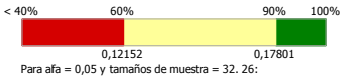
Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	✓	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Normalidad	✓	Debido a que el tamaño de ambas muestras es por lo menos 15, la normalidad no representa ningún problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de muestra son suficiente grandes.
Tamaño de la muestra	✓	La muestra es suficiente para detectar una diferencia entre las medias.
Varianza igual	i	La t de 2 muestras utilizada por el Asistente de Minitab no asume ni requiere que las dos muestras tengan varianzas iguales. Los estudios demuestran que la prueba se desarrolla adecuadamente con varianzas desiguales, incluso cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Prueba t de 2 muestras para la media de Px_F1 y Px_F2
Informe de diagnóstico

Orden de los datos en la hoja de trabajo
Investigar valores atípicos (marcados en rojo).



Potencia
¿Cuál es la probabilidad de detectar una diferencia?



Para alfa = 0,05 y tamaños de muestra = 32. 26:
Si hubiera una diferencia de 0,12152 entre las medias, usted tendría una probabilidad de 60% de detectar la diferencia. Si la diferencia fuera de 0,17801, tendría una probabilidad de 90,

¿Qué diferencia puede detectar con sus tamaños de muestra de 32 y 26?

Diferencia	Potencia
0,12152	60,0
0,13641	70,0
0,15384	80,0
0,17801	90,0

La potencia es una función de los tamaños de las muestras y las desviaciones estándar. Para detectar una diferencia menor que 0,15384, considere aumentar los tamaños de las muestras.

Prueba t de 2 muestras para la media de Px_F1 y Px_F2
Informe de resumen

¿Difieren las medias?

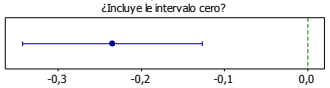
P = 0,000
La media de Px_F1 es significativamente diferente de la media de Px_F2 (p < 0,05).

Estadísticas	Px_F1	Px_F2
Tamaño de la muestra	32	26
Media	0,25389	0,48877
IC de 95%	(0,2015. 0,3062)	(0,39196. 0,58558)
Desviación estándar	0,14520	0,23969

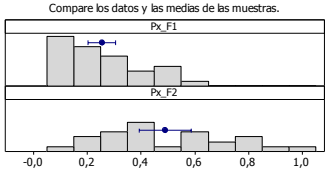
Diferencia entre medias*	-0,23488
IC de 95%	(-0,34321. -0,12655)

* La diferencia se define como Px_F1 - Px_F2.

IC de 95% para la diferencia
¿Incluye le intervalo cero?



Distribución de los datos
Compare los datos y las medias de las muestras.



Comentarios

-- Prueba: Usted puede concluir que las medias difieren en el nivel de significancia de 0,05.
-- IC: Cuantifica la incertidumbre asociada a la estimación de la diferencia a partir de los datos de las muestras. Usted puede tener una seguridad de 95% de que la diferencia verdadera se encuentra entre -0,34321 y -0,12655.
-- Distribución de datos: Compare la ubicación y las medias de las muestras. Busque datos poco comunes antes de interpretar los resultados de la prueba.