

**EVALUACION DE LA TRATABILIDAD DE LA MEZCLA DE AGUAS
RESIDUALES PROCEDENTES DEL SECTOR MALTERIA EN MANIZALES**

**Documento presentado como requisito parcial para optar al título de
QUIMICO INDUSTRIAL**

**LUISA FERNANDA MONTOYA ALVAREZ
ALEXANDRA OSPINA GIL**

**Director
Dr. Ing. Diego paredes cuervo
Ingeniero sanitario**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIAS
ESCUELA DE QUIMICA
PEREIRA
2013**

NOTA DE ACEPTACION DEL TRABAJO DE GRADO

**EVALUACION DE LA TRATABILIDAD DE LA MEZCLA DE AGUAS
RESIDUALS PROCEDENTES DEL SECTOR MALTERIA EN MANIZALES**

Presentado por:

**LUISA FERNANDA MONTOYA ÁLVAREZ
ALEXANDRA OSPINA GIL**

Los suscritos director y jurado del presente trabajo de grado, una vez revisada la versión escrita y presenciando la sustentación oral decidimos otorgar:

La nota de: _____

Con la connotación de: _____

Para constancia firmamos en la ciudad de Pereira hoy _____

Director: _____

**Diego paredes cuervo
PhD M.Sc. Ing. sanitario**

Jurado: _____

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios por haberme dado la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres y mi hermana por su amor incondicional, porque me acompañaron en este largo camino y de una u otra forma siempre han sido mi soporte.

A mi novio que me ha dado todo su apoyo, amor, paciencia y por haber tenido siempre las palabras correctas que me impulsaron en los momentos difíciles.

A mis amigos que desde el comienzo me han acompañado, me demostraron su cariño e hicieron que mis días en la universidad estuvieran llenos de lindas experiencias.

LUISA FERNANDA MONTOYA ALVAREZ

A DIOS Porque me ha iluminado y a cuidado de mí y mi familia. Por todas las bendiciones que derrama sobre mí día a día y por las oportunidades que me ha brindado. Gracias dios por todo lo que das día a día.

A MI MAMA Y MI ABUELA Por la valiosa educación que me brindaron, por todos sus sacrificios, por ser los ángeles en mi vida. Esto es por ustedes y para ustedes, gracias, las amo muchísimo.

A MI ESPOSO Por toda tu ayuda y comprensión, porque estoy donde estoy por ti, gracias por tu compañía y amor y por hacerme feliz cada día.

A MIS AMIGOS Por su cariño y apoyo incondicional, porque a pesar de las diferencias siempre nos tendremos los unos a los otros, por los inolvidables momentos que viví con ustedes y porque es mejor la calidad que la cantidad.

ALEXADRA OSPINA GIL

A el profesor Diego Paredes cuervo y a Janneth Cubillos por guiarnos durante el desarrollo del trabajo y ayudarnos con todos sus conocimientos, a la facultad de ciencias ambientales por dejarnos realizar el trabajo en las instalaciones del laboratorio de procesos biológicos y a las personas que trabajan en el por habernos colaborado.

TABLA DE CONTENIDO

1.MARCO TEORICO	24
1.1. EL AGUA	24
1.2 RECURSOS HÍDRICOS EN COLOMBIA.	25
1.3 CONTAMINACIÓN DEL AGUA EN COLOMBIA.....	25
1.4 AGUA RESIDUAL.....	26
1.5 CONTAMINACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA.....	26
1.6 CARACTERISTICAS DEL AGUA RESIDUAL	27
1.6.1 Materia orgánica	27
1.6.2 Sólidos suspendidos	27
1.6.3 Sólidos disueltos	27
1.6.4 Temperatura	28
1.6.5 Color	28
1.6.6 Compuestos inorgánicos tóxicos	28
1.6.7 Compuestos orgánicos tóxicos	28
1.6.8 Nutrientes vegetales inorgánicos	28
1.6.9 Microorganismos.....	29
1.6.10 Detergentes	29
1.6.11 Acidez	29
1.6.12 Alcalinidad	29
1.6.13 Grasas y aceites	29
1.6.14 Olor.....	30
1.6.15 pH	30
1.6.16 Oxigeno disuelto	30

1.6.17 Nitrógeno total.....	30
1.6.18 Metales	31
1.7 TRATAMIENTOS PARA EL AGUA RESIDUAL.....	31
1.7.1 Tratamiento primario.....	31
1.7.2 Tratamiento secundario	32
1.7.3 Tratamiento terciario	32
1.8 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS: AEROBIO Y ANAEROBIO	33
1.8.1 Proceso Aerobio	33
1.8.2 Proceso anaerobio.....	36
1.8.2.1 Hidrólisis	39
1.8.2.2 Etapa Fermentativa o Acidogénica	40
1.8.2.3 Etapa Acetogénica.....	41
1.8.2.4 Etapa Metanogénica.....	41
1.9 PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN EL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO ANAEROBIO	44
1.9.1 Temperatura	44
1.9.2 pH y Alcalinidad	45
1.9.3 Nutrientes	46
1.9.4 Potencial redox.....	46
1.9.5 Tóxicos e inhibidores	47
1.9.6 Ácidos Grasos Volátiles	47
1.9.7 Hidrogeno	47
1.9.8 Nitrógeno amoniacal.....	47
1.9.9 Sulfatos y sulfuros.....	48

1.9.10 Cationes y metales pesados	48
1.9.11 Otros inhibidores.....	49
1.9.12 Velocidad de carga orgánica y tiempo de retención	49
1.9.13 Agitación	50
1.10 TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN EL TRABAJO DE GRADO	51
1.10.1 Tratamiento aerobio: Ensayo Zahn Wellenes Iso 9888	51
1.10.2 Tratamiento Anaerobio: Ensayo Actividad Metanogénica Específica	52
3. MARCO GEOGRAFICO	55
3.1 Extensión y cobertura	55
3.2 Diagnóstico ambiental.....	56
4. METODOLOGÍA	58
4.1 Muestra de análisis	58
4.2 Muestreo	58
4.3 Inoculo	60
4.4 Ensayo aerobio: Zahn Wellens	61
4.4.1 Primer montaje: Muestreo 5 y el 11 de junio de 2012.....	62
4.4.1.1 Lodo relleno sanitario Yotoco, Cali (lodos activados)	62
4.4.2 Segundo montaje: muestreo 18 de julio de 2012.....	62
4.4.2.1 Inóculo relleno sanitario Yotoco, Cali (lodos activados).....	63
4.4.2.2 Inóculo planta de tratamiento Universidad Tecnológica de Pereira (lodos activados)	63
4.4.3 Tercer montaje: Muestreo 08 y 14 de agosto	63
4.4.3.1 Inóculo planta de tratamiento Universidad Tecnológica de Pereira (lodos activados)	63
4.5 Ensayo Anaerobio Actividad Metanogénica Especifica (AME)	64

4.5.1 Primer montaje: Muestreo 5 y 11 de junio de 2012.....	65
4.5.1.1 Lodo relleno sanitario de Yotoco, Cali (Reactor UASB).....	65
4.5.2 Segundo montaje: Muestreo 18 de julio de 2012.....	65
4.5.2.1 Inoculo relleno sanitario Combia, Pereira (anaerobio).....	65
4.5.3 Tercer montaje: Muestreo 08 y 14 de agosto.....	66
4.5.3.1 Inoculo planta de tratamiento de agua Postobon S.A. Pereira (Reactor UASB).....	66
4.5.3.2 Inóculo relleno sanitario Combia, Pereira (anaerobio).....	66
4.6 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS ANALIZADOS.....	67
4.6.1 Demanda Química de Oxígeno.....	67
4.6.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	67
4.6.3 Sólidos suspendidos totales.....	68
4.6.4 Sólidos Suspendidos Volátiles.....	69
4.6.5 Ácidos Grasos Volátiles.....	69
4.6.6 Alcalinidad.....	69
4.6.7 pH.....	70
4.6.8 Nitrógeno.....	70
4.6.9 ANALISIS ESTADISTICO.....	71
5. RESULTADOS Y DISCUSION.....	72
5.1 MUESTRA DE ANALISIS.....	72
5.2 ANALISIS CUANTITATIVO.....	72
5.2.1 Análisis estadístico para cada muestreo.....	72
7. CONCLUSIONES.....	100
8. RECOMENDACIONES.....	102

9. BIBLIOGRAFIA.....	103
10. ANEXOS.....	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso aerobio.....	35
Tabla 2. Ventajas y desventajas del proceso anaerobio.....	51
Tabla 3. Clasificación industrial internacional uniforme de las actividades económicas del sector industrial.....	59
Tabla 4. % Tasa de remoción (mg O ₂ /h) tratamiento aerobio.....	76
Tabla 5. % Tasa de remoción (mg O ₂ /h) tratamiento anaerobio.....	77
Tabla 6. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	809
Tabla 7. Test de Levene para ensayo aerobio.....	80
Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para ensayo aerobio.....	80
Tabla 9. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para ensayo anaerobio.....	81
Tabla 10. Prueba de Levene ensayo anaerobio.....	821
Tabla 11. Prueba de Kruskal-Wallis para ensayo anaerobio.....	821
Tabla 12. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para ambos tratamientos.....	832
Tabla 13. Prueba de Levene para ambos tratamientos.....	832
Tabla 14. Prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para ambos tratamientos.....	82
Tabla 15. Constantes de velocidad.....	86
Tabla 16. Resultados finales Actividad Metanogénica Específica.....	91
Tabla 17. Parámetros fisicoquímicos totales ensayo aerobio.....	95
Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos totales tratamiento anaerobio.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama elemental proceso aerobio.....	33
Figura 2. Ecuaciones del proceso de oxidación aerobia.....	34
Figura 3. Reacciones esenciales del proceso aerobio.....	35
Figura 4. Diagrama simplificado de la oxidación anaerobia.....	36
Figura 5. Diagrama elemental de proceso anaerobio.....	37
Figura 6. Formación de metano en la digestión anaerobia.....	38
Figura 7. Reacciones metanogénicas del proceso anaerobio.....	43
Figura 8. Trayectorias de fermentación de metano.....	44
Figura 9. Ecuaciones que resumen el proceso anaerobio.....	45
Figura 10. Microcuenca de la quebrada Manizales.....	56
Figura 11. Salida ARI Progel.....	60
Figura 12. Quebrada Manizales.....	60
Figura 13. Lodo anaerobio empresa Postobon.....	61
Figura 14. Lodo aerobio PTAR UTP.....	61
Figura 15. Lodo anaerobio relleno sanitario Yotoco, Cali.....	61
Figura 16. Montaje aerobio.....	63
Figura 17. Montaje anaerobio.....	66
Figura 18. Digestor DQO.....	67
Figura 19. Montaje DQO.....	67
Figura 20. Montaje DBO ₅	68
Figura 21. filtracion SST.....	68
Figura 22. Crisoles SST.....	68
Figura 23. Montaje ácidos grasos volátiles.....	69

Figura 24. Determinación alcalinidad.....	69
Figura 25. Medición pH.....	70
Figura 26. Digestor nitrógeno Kjeldahl.....	71
Figura 27. Destilador nitrógeno.....	71
Figura 28. Grafica DQO aerobia muestreo 1.....	73
Figura 29. Grafica DQO aerobia muestreo 2.....	73
Figura 30. Grafica DQO aerobia muestreo 3.....	73
Figura 31. Grafica DQO aerobia muestreo 4.....	73
Figura 32. Grafica DQO aerobia muestreo 5.....	73
Figura 33. Grafica DQO anaerobio muestreo 4 (LN).....	74
Figura 34. Grafica DQO anaerobio muestreo 4 (LV).....	74
Figura 35. Grafica DQO anaerobio muestreo 5 (LN).....	74
Figura 36. Grafica DQO anaerobio muestreo 5 (LV).....	74
Figura 37. Grafica cinética de la reacción muestreo 1 aerobio.....	83
Figura 38. Grafica cinética de la reacción muestreo 2 aerobio.....	83
Figura 39. Grafica cinética de la reacción (LN) muestreo 3 aerobio.....	84
Figura 40. Grafica cinética de la reacción (LV) muestreo 4 aerobio.....	84
Figura 41. Grafica cinética de la reacción muestreo 4 aerobio.....	84
Figura 42. Grafica cinética de la reacción muestreo 5 aerobio.....	84
Figura 43. Grafica cinética de la reacción muestreo 4 (LN) anaerobio.....	84
Figura 44. Grafica cinética de la reacción muestreo 4 (LV) anaerobio.....	84
Figura 45. Grafica cinética de la reacción muestreo 5 (LN) anaerobio.....	85
Figura 46. Grafica cinética de la reacción muestreo 5 (LV) anaerobio.....	85

Figura 47. Grafica % de remoción DQO primer muestreo ensayo aerobio.....	86
Figura 48. Grafica % de remoción DQO segundo muestreo ensayo aerobio.....	86
Figura 49. Grafica % de remoción DQO tercer muestreo ensayo aerobio.....	87
Figura 50. Grafica % de remoción DQO cuarto muestreo ensayo aerobio.....	87
Figura 51. Grafica % de remoción DQO quinto muestreo ensayo aerobio.....	87
Figura 52. Grafica % de remoción DQO cuarto muestreo ensayo anaerobio.....	89
Figura 53. Grafica % de remoción DQO quinto muestreo ensayo anaerobio.....	89
Figura 54. Grafica comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo primer muestreo reactores anaerobios.....	93
Figura 55. Grafica comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobios.....	93
Figura 56. Grafica comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución (CD) y sin dilución (SD).....	93
Figura 57. Grafica comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN).....	93
Figura 58. Grafica comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo quinto reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN).....	94

LISTA ANEXOS

Anexo 1. Tabla del comportamiento pH Vs tiempo primer muestreo reactores anaerobios.....	109
Anexo 2. Grafica del comportamiento pH Vs tiempo primer muestreo reactores anaerobios.....	110
Anexo 3. Grafica comportamiento pH Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobios.....	110
Anexo 4. Grafica comportamiento pH Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución CD y sin dilución SD.....	110

Anexo 5. Grafica comportamiento pH Vs tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo Relleno Sanitario Combia LV y lodo empresa Postobon LN.....	110
Anexo 6. Grafica comportamiento pH Vs tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo Relleno Sanitario Combia LV y lodo empresa Postobon LN.....	111
Anexo 7. Tabla comportamiento DQO y porcentaje de remoción en el tiempo primer muestreo reactores anaerobios.....	111
Anexo 7.Grafica comportamiento DQO Vs tiempo primer muestreo reactores anaerobios.....	111
Anexo 8. Grafica comportamiento DQO Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobios.....	111
Anexo 9. Grafica comportamiento DQO Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución CD y sin dilución SD.....	111
Anexo 10. Tabla comportamiento pH Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobios.....	112
Anexo 11. Tabla comportamiento pH Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución CD y sin dilución SD.....	112
Anexo 12. Tabla comportamiento pH Vs tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo Relleno Sanitario Combia LV y lodo empresa Postobon LN.....	113
Anexo 13. Tabla comportamiento pH Vs tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo Relleno Sanitario Combia LV y lodo empresa Postobon LN.....	114
Anexo 14. Tabla comportamiento DQO y porcentaje de remoción en el tiempo primer muestreo reactores anaerobios.....	114
Anexo 15. Tabla comportamiento DQO y porcentaje de remoción en el tiempo segundo muestreo reactores anaerobios.....	115
Anexo 16. Tabla comportamiento DQO y porcentaje de remoción en el tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución CD y sin dilución SD.....	116
Anexo 17. Tabla porcentajes de remoción muestreos del uno al tres ensayo anaerobio	117

Anexo 18. Tabla volumen acumulado de biogás primer muestreo reactores anaerobios.....	118
Anexo 19. Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo segundo muestreo reactores anaerobios.....	120
Anexo 20. Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución CD y sin dilución SD.....	123
Anexo 21. Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia LV y lodo de la empresa Postobon LN.....	125
Anexo 22. Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo Relleno Sanitario Combia LV y lodo de la empresa Postobon.....	127
Anexo 23. Tabla comportamiento pH en el tiempo primer muestreo reactores aerobios.....	129
Anexo 24. Grafica comportamiento pH Vs tiempo primer muestreo reactores aerobios.....	130
Anexo 25. Grafica comportamiento pH vs tiempo segundo muestreo reactores aerobios.....	130
Anexo 26. Grafica comportamiento pH vs tiempo tercer muestreo reactores aerobios lodo Relleno sanitario de Yotoco Cali y lodo Planta de Tratamiento de Aguas Residuales UTP LN.....	130
Anexo 27. Grafica comportamiento pH Vs tiempo cuarto muestreo reactores aerobios.....	130
Anexo 28. Tabla del comportamiento pH en el tiempo segundo muestreo reactores aerobios.....	131
Anexo 29. Tabla comportamiento pH en el tiempo tercer muestreo reactores aerobios lodo Relleno Sanitario de Yotoco Cali LV y lodo Planta de Tratamiento de Aguas residuales UTP LN.....	132
Anexo 30. Tabla comportamiento pH en el tiempo tercer muestreo reactores aerobios.....	133

Anexo 31. Tabla comportamiento pH en el tiempo quinto muestreo reactores aerobios.....	134
Anexo 32. Grafica comportamiento pH vs tiempo quinto muestreo reactores aerobios.....	135
Anexo 33. Tabla comportamiento DQO soluble y porcentaje de remoción en el tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo Relleno Sanitario Combia LV y lodo de la empresa Postobon LN.....	136
Anexo 34. Grafica comportamiento DQO soluble Vs tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN).....	137
Anexo 35. Grafica comportamiento DQO soluble Vs tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN).....	137
Anexo 36. Tablas comportamiento DQO soluble y porcentajes de remoción en el tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN).....	137
Anexo 37. Tabla porcentajes de remoción muestreos 4 y 5 filtrados ensayo anaerobio, utilizando lodo de la empresa Postobon (LN) y lodo del relleno sanitario de Combia (LV).....	138
Anexo 38. Grafica porcentajes de remoción cuarto muestreo ensayo anaerobio filtrado utilizando lodo de la empresa Postobon (LN) y lodo del relleno sanitario de Combia (LV).....	139
Anexo 39. Grafica porcentajes de remoción quinto muestreo ensayo anaerobio filtrado lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN).....	139
ANEXO 40. Tabla comportamiento DQO reactores aerobios.....	139
ANEXO 41. Tabla comportamiento DQO reactores anaerobios.....	140

RESUMEN

Se estudió la degradación de las aguas residuales provenientes del sector Maltería, zona industrial de Manizales, ya que esta quebrada recibe los residuos generados por las distintas industrias ubicadas en este sector lo que causa un deterioro en la calidad del agua, con el fin de comparar dos métodos de degradación a escala de laboratorio y determinar cuál era el más adecuado para lograr un mayor porcentaje de remoción de materia orgánica de la mezcla.

Los métodos utilizados fueron aerobio Zahn Wellens ISO 9888 y el método anaerobio Actividad Metanogénica Especifica AME, para el desarrollo de estos métodos se realizaron varios muestreos en diferentes fechas, en los cuales no estaban presentes el total de los vertimientos industriales. La disminución de la materia orgánica se evaluó midiendo la demanda química de oxígeno (DQO), tomando alícuotas de los reactores dos veces por semana durante un periodo aproximado de 40 días para cada muestreo, adicional a esto para el método anaerobio se realizó la medición diaria de producción de metano por el desplazamiento de hidróxido de sodio.

Con respecto a las mezclas analizadas se encontraron unos porcentajes de remoción entre el 50 y el 80% para ambos tratamientos, utilizando lodos provenientes de diferentes plantas de tratamiento, obteniéndose como resultado un porcentaje mayor con los lodos de las plantas de tratamientos de aguas residuales. Para el tratamiento anaerobio se realizó la medición de la actividad metanogénica específica encontrándose valores menores de 0,02-0,2 (gDQO/gSTV*d).

Se realizó a la mezcla inicial y final que contenía las aguas de cada una de las industrias que realizan los vertimientos al cauce de la quebrada, la medición de los siguientes parámetros: DQO, DBO₅, alcalinidad, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, ácidos grasos volátiles, pH y nitrógeno Kjeldahl total.

Con los resultados obtenidos para cada tratamiento en todos los muestreos se realizó el análisis estadístico ANOVA con el que se pudo determinar que para las condiciones bajo las cuales se realizó este trabajo no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (aerobio y anaerobio).

ABSTRAC

To compare two methods of laboratory scale degradation and determine which was the best to achieve a higher percentage of organic matter removal in a mixture, wastewater degradation of the creek located in the area Maltería, Manizales industrial zone was studied, because it receives waste generated by different industries in this sector and this is causing a deterioration in water quality.

The methods used were aerobic Zahn Wellens method ISO 9888 and AME Specifies anaerobic methanogenic activity, for the development of these methods were performed several samples on different dates, in which there were not the total industrial discharges. The reduction of the organic material was evaluated by measuring the chemical oxygen demand (DQO), by taking aliquots of the reactors twice weekly over a period of approximately 40 days for each sample, in addition to this method for anaerobic daily measurement was performed methane Production by displacing sodium hydroxide.

With respect to the mixtures tested were found removal percentages between 50 and 80% for both treatments, using different sludge from treatment plants, obtaining as a result a greater percentage with sludge from treatment plants wastewater. Anaerobic treatment was performed measuring the specific methanogenic activity under 0.02-0.2 finding values ($\text{gDQO} / \text{gSTV} \cdot \text{d}$).

In the initial mixture and in the final mixing was performed to measure the following parameters: DQO, DBO_5 , alkalinity, total suspended solids, volatile suspended solids, volatile fatty acids, pH and total Kjeldahl nitrogen.

With the results obtained for each treatment in all samples was performed statistical analysis ANOVA with which it was determined that for the conditions under which this work was done there was no significant difference between these.

INTRODUCCION

La Unesco en su primer informe de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo (agua para todos agua para la vida, 2003) define que el 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico.[1] Se proyecta que para el 2025 el agua destinada para uso industrial será de 1.170 km³ / año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km³ / año. Se estima que el 80% de los desechos peligrosos del mundo se produce en los países desarrollados, el 70% en los países en vía de desarrollo donde estos son vertidos a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento. [2]

Los datos anteriores nos hacen ver lo importante de un tratamiento y posterior reutilización de aguas residuales en el sector industrial mundial, siendo esto de mayor importancia para los países más limitados en sus recursos hídricos, ya que el agua de calidad es indispensable para la industria [2]

Se estima que la producción de aguas residuales es aproximadamente 1500 Km³ sabiendo que 1 litro de ésta contamina 8 litros de agua dulce, con lo cual se prevé que la contaminación mundial puede aumentar actualmente a 12000 Km³, generalmente estas aguas son contaminadas diariamente por residuos industriales y químicos, vertidos humanos y desechos agrícolas. [3]

La producción de aguas residuales es un resultado inevitable de la actividad humana. Para realizar un tratamiento adecuado se deben conocer sus características físicas, químicas, biológicas y los efectos que estas producen a los cuerpos de agua receptores. Deben cumplir con la reglamentación de las leyes ecológicas y tener un costo mínimo para su construcción y operación y así no afectar la economía de las industrias. [4, 5]

La biodegradabilidad se define como la capacidad propia de una sustancia a ser transformada en una estructura química más simple y menos toxica por vía microbiana. La biodegradabilidad puede ser primaria y conducir a simples alteraciones estructurales del compuesto, o implicar la conversión a productos inorgánicos de bajo peso molecular y constituyentes celulares, la cual se denomina biodegradación última o mineralización. [6]

Compuesto orgánico + O₂ microorganismos > CO₂ + H₂O + sales + biomasa

La digestión aerobia es un proceso a el cual se le suministra aireación durante un periodo de tiempo significativo, cuyo resultado es la destrucción de células, y una

disminución de sólidos en suspensión volátiles (SSV). El objetivo principal de la digestión aerobia es la reducción del total de lodos a evacuar al final del tiempo de operación, esta reducción se lleva a cabo por la oxidación de una parte del lodo en productos volátiles (CO_2 , NH_3 , H_2). [7]

En la digestión anaerobia los microorganismos degradan la biomasa para descomponer las moléculas orgánicas complejas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea (sin adición de energía). El resultado de esta fermentación se denomina biogás (mezcla de metano y CO_2) que puede ser usado para obtener energía. Los otros productos resultantes de esta degradación son el fósforo, el nitrógeno y otros elementos minerales presentes en la mezcla inicial los cuales son complicados para degradarse. [8]

En este trabajo se evaluó la biodegradabilidad del agua residual del sector Maltería en Manizales mediante la comparación de los métodos regidos por la norma ISO 9888, para el tratamiento aerobio y el ensayo de Actividad Metanogénica Específica (AME), para el tratamiento anaerobio. Determinándose por un tratamiento estadístico de los datos obtenidos, cual método es más eficiente para el tratamiento de esta agua.

Estos métodos de evaluación de la biodegradabilidad, se utilizaron en el proyecto pues se han encontrado varias investigaciones donde se comprobó la utilidad de estos para obtener buenos porcentajes de degradación en mezclas de aguas industriales, lo que es de gran utilidad para lograr los objetivos de este trabajo, ya que dependiendo de la eficiencia de los métodos decidimos cuál es el procedimiento a seguir para tratar las aguas residuales que se vierten actualmente a la quebrada Manizales en el sector industrial Maltería.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el sector de Maltería, zona industrial de Manizales, la quebrada Manizales se encuentra fuertemente afectada por los vertimientos líquidos generados en las industrias de este sector, lo que ha causado un deterioro en la calidad del agua, debido al aporte de cargas contaminantes provenientes de residuos de difícil tratamiento como vinazas, residuos de industria lechera, metales pesados, entre otros; así mismo de algunos residuos de tipo doméstico provenientes de estas industrias y de algunas viviendas ubicadas en sus alrededores.

La quebrada Manizales es un tributario directo del río Chinchiná, el cual actualmente cuenta con la ordenación del recurso hídrico en la cuenca y la respectiva determinación de los objetivos de calidad. Por esta razón la Corporación ambiental de Caldas, Corpocaldas desde el año 2005 inició la evaluación, planificación y ejecución de la construcción del interceptor Quebrada Manizales, con el cual se busca captar la mayor cantidad de vertimientos líquidos realizados en ese sector hasta convertirlos en una sola fuente de contaminación.

Debido a lo anterior, se hace necesario realizar la evaluación de la mezcla de vertimientos generados en el sector y la implementación del estudio de tratabilidad de esta, para determinar cual alternativa de tratamiento (aerobia o anaerobia) puede ser más aplicable para mejorar su calidad.

Actualmente se conocen gran variedad de procesos para depurar aguas residuales domésticas e industriales, con el fin de encontrar un proceso tecnológico que se pueda implementar como tratamiento en este caso específico, se van a realizar ensayos de biodegradabilidad aerobio y anaerobio a pequeña escala (en el laboratorio).

Con base en lo anteriormente mencionado se pretende conocer cual método de biodegradabilidad es más eficiente para tratar las aguas residuales provenientes del sector Maltería en la quebrada Manizales.

ANTECEDENTES

La quebrada Manizales fue un lugar de recreación y pesca para los habitantes de este sector hasta los años 60s, desde que se ubico en el sector Malteria en el año 1967 la Industria Licorera de Caldas que trajo consigo economía a la ciudad. El aporte de esta industria sumada al aumento de los habitantes y la actividad agrícola, incrementó la contaminación de las aguas y disminuyo su capacidad de depuración. [9, 10]

En la actualidad alrededor de la quebrada Manizales se encuentran aproximadamente 183 industrias, según datos de cámara y comercio, algunas de estas son: Descafecol, Progel, industria licorera de caldas, Colombit, Terpel entre otras. Aguas abajo la quebrada tesorito se une al cauce de la quebrada Manizales y adiciona a ésta los vertimientos de: Decafecol, Iderna, Súper de alimentos, Madeal, Toptec, Incolto, Herrago y aguas residuales de los barrios la enea, Cerros de Alhambra y San Marcel que incrementan el vertimiento de residuos líquidos y sólidos, lo que causa malos olores por el aumento en la demanda biológica y química de oxígeno. [9, 10]

El rio Chinchiná es utilizado para actividades de riego, consumo y generación eléctrica, después de que las aguas de la quebrada Manizales son vertidas a éste. Debido a la gran carga contaminante que contienen éstas se hace necesario implementar sistemas para su tratamiento y recuperación. [9]

En la quebrada han sido realizados estudios en entorno a su calidad, algunos de los cuales se resumen a continuación.

ESTUDIO DE LA QUEBRADA MANIZALES (1989)

Este estudio fue desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia en 1989, cuyo objetivo era realizar un análisis físico-químico de las aguas provenientes de la quebrada Manizales determinando los niveles de contaminación en cinco zonas : zona 1 CASCADAS : zona agrícola y minería, Zona 2 MALTERIA : sector industrial y urbano, Zona 3 : PARQUE INDUSTRIAL JUANCHITO: zona industrial, Zona 4: LA ENEA: zona principalmente urbana y Zona 5:DESEMBOCADURA: sector recreacional principalmente , utilizando técnicas analíticas basadas en operaciones y procesos unitarios, proporcionando la base para un programa de control y monitoreo de las aguas de la quebrada , labor que no había sido asumida por otra entidad hasta el momento. Los muestreos fueron realizados durante mes

y medio, una estación semanal y dos veces al año, cubriendo distintas épocas climáticas. [9]

ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO CHINCINA Y DE LA QUEBRADA LLANO GRANDE (1997)

Este estudio fue realizado por la Universidad de Caldas en conjunto con CORPOCALDAS en 1997 con el fin de determinar la calidad de las principales corrientes de agua de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná y de la quebrada llano grande. Para su desarrollo se realizaron diferentes muestreos en 7 estaciones respectivas de la zona. M₀ (cascada), M₁ (la coqueta), M₂ (canal de Colombit), M₃ (la selva), M₄ (industria licorera de caldas), M₅ (el pinar) y M₆ (parque bicentenario). [9]

ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA SUBCUENCA DEL RIO CHINCHINA (2005)

En el trabajo actualizado por CORPOCALDAS durante el año 2005, a través de la fundación PROAGUA, se realizó el diagnóstico de calidad del recurso hídrico en la subcuenca del río Chinchiná, este análisis permitió conocer las características fisicoquímicas y microbiológicas del río Chinchiná, y permitió evaluar la carga contaminante aportada por los principales tributarios, a lo largo de su cauce. [9]

En esta evolución se determinó que la quebrada Manizales tuvo una concentración de 193,4 mg/l para DBO₅ total y 90,75 mg/l para DBO₅ filtrada en invierno y una concentración de 441mg/l para DBO₅ total y 173 mg/l para DBO₅ filtrada en verano, comportamiento asociado con la descarga de aguas residuales domésticas e industriales a este tributario. Los valores de la DBO₅ presentados en esta quebrada se encuentran muy por encima del valor típico de DBO₅ reportado por la UNESCO (1996) en corrientes superficiales contaminadas (DBO₅ menor a 2 mg/l). [9]

En la quebrada Manizales las concentraciones de DQO indicaron una elevada contaminación, con valores registrados en invierno de 586 mg/l y 45 mg/l para DQO total y de 165 mg/l y 35 mg/l para DQO filtrada respectivamente y valores en verano de 495 mg/l y 34,4 mg/l para DQO total y 234 mg/l y 15,6 mg/l para DQO filtrada respectivamente. Es de destacar que la quebrada Manizales presentó el mayor valor de DQO en todo el río Chinchiná en invierno y superó el valor típico que ese presenta en aguas residuales domésticas (DQO igual a 500 mg/l) reportado por Romero (2000), reflejando

la gran contaminación que recibe este tributario debido a aguas residuales domésticas e industriales. [9]

La concentración de SST que más aportó el río Chinchiná fue la quebrada Manizales debida a la descarga de efluentes industriales y domésticos ubicados en la zona. La carga contaminante de SST en este tramo vario entre 48 y 24.195 Kg/días de SST en invierno y entre 13 y 11.499 Kg/día de SST en verano, siendo la quebrada Manizales la que mayor aporte de sólidos descargo al río Chinchiná en este tramo. [9]

Este reporte permitió determinar que la quebrada Manizales se encuentra bastante deteriorada en términos de calidad generando uno de los aportes más altos de carga contaminante sobre el río Chinchiná. [9]

DETERMINACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE ORIGEN INDUSTRIAL VERTIDA SOBRE LA QUEBRADA MANIZALES (2007)

Este trabajo determinó las cargas contaminantes vertidas por el sector industrial sobre la quebrada Manizales, pretende suplir la necesidad de información, actualizando y complementando los datos de calidad existentes de tal forma que sea útil para el establecimiento de una línea base ambiental de la quebrada Manizales, como herramienta para la gestión de este importante recurso hídrico, basada en el manejo de información disponible y actualiza el diagnóstico de empresas ubicadas en el sector. [9]

El análisis sobre la magnitud de la carga contaminante vertida fue realizado con base en la clasificación por actividad económica de las diferentes empresas y finalmente muestra la proporción del impacto ambiental de los vertimientos industriales en relación con la contaminación de origen doméstico del municipio de Manizales. [9]

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar la tratabilidad de la mezcla de aguas residuales industriales y domésticas, procedentes del sector Maltería en Manizales

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar las aguas residuales evaluando parámetros fisicoquímicos como: Demanda química de oxígeno (DQO), Demanda biológica de oxígeno (DBO₅), Sólidos suspendidos volátiles (SSV), Sólidos suspendidos totales (SST), Alcalinidad y pH.
- Realizar las pruebas de biodegradabilidad aerobia y anaerobia para la mezcla de aguas residuales procedentes del sector Maltería en Manizales.
- Establecer cuál es la mejor alternativa de tratamiento (aerobia o anaerobia) para la mezcla de aguas residuales procedentes del sector Maltería en Manizales, mediante un método de estadística comparativa denominado ANOVA (Análisis de varianza) de un factor.

1. MARCO TEORICO

La cantidad de agua dulce presente en la tierra es suficiente para satisfacer las necesidades de la población, pero no se encuentra distribuida de forma equitativa para los diferentes países. La población residente en países desarrollados tiene la facilidad de obtener agua limpia sin dificultad, mientras que en los países subdesarrollados está es casi un privilegio, debido a esto se calcula que en el mundo hay más de 1200 millones de personas sin acceso a agua potable y que mueren diariamente 25.000 personas por enfermedades al usar agua contaminada. [11]

Sin embargo, el agua no es un compuesto que se mantiene estático en la naturaleza. El ciclo hidrológico empieza con la evaporación del agua desde la superficie de los océanos o de otras fuentes de agua libre. A medida que se eleva (evaporación) el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua (condensación), las gotas se juntan y forman una nube, para luego caer por su propio peso (precipitación). [12]

Una parte del agua que llega a la superficie terrestre será aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como escorrentía. Otro porcentaje del agua se filtrará a través del suelo, formando capas de agua subterránea, conocidas como acuíferos. Este proceso es la percolación. Tarde o temprano, esta agua llegará a la superficie y volverá nuevamente a la atmósfera, dando inicio a un nuevo ciclo. [12]

1.1. EL AGUA

Gracias al gran desarrollo industrial, tecnológico y el crecimiento de la población mundial se ha presentado un incremento en la demanda del agua, lo que ha ocasionado un aumento en la contaminación por residuos domésticos e industriales, que han alterado el ciclo natural de ésta y que actualmente se han convertido en un problema crónico y preocupante para la población. Diariamente son vertidas 2 millones de toneladas de desechos al agua. La población mundial en el siglo pasado se triplicó, y la demanda de agua se sextuplicó, se calcula que para el año 2050 la escasez de agua dulce afecte a 1 de cada 4 personas. [13]

Desde 1970 la población aumentó casi en 2.000 millones de habitantes lo que implica que ahora se dispone de un tercio menos de agua per cápita ya que se necesitan aproximadamente 64.000 millones de metros cúbicos por año. El

problema se agrava si se espera que para el año 2050 la población alcance los 9.000 millones. [12]

1.2 RECURSOS HÍDRICOS EN COLOMBIA.

Por su ubicación Colombia es un país privilegiado por su sistema hidrológico, cuenta con aproximadamente un millón de Km² de mares y más de 714.000 cuencas hidrográficas mayores de 10 Km², cuenta con un promedio anual de 2.000 mL de lluvia para los 114 millones de hectáreas que lo conforman. Estos sistemas están divididos en las cuencas del Caribe, Pacífico, y Amazonas-Orinoco. [14]

Caldas maneja 48 microcuencas para abastecer las plantas de agua potable de los 25 municipios del departamento, Manizales se abastece de Rio Blanco, quebradas Cajones y California y del río Chinchiná para la potabilización del agua. La circundan, la quebrada Manizales y la quebrada Olivares que corren de oriente a occidente y terminan en el río Chinchiná después de recoger la mayoría de descoles de agua residual municipal. [14]

1.3 CONTAMINACIÓN DEL AGUA EN COLOMBIA

En el informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (agua para todos agua para la vida) Colombia ocupa el puesto 24 actualmente entre 203 países, mientras que a finales del siglo XX ocupaba el 4 puesto a nivel mundial. Este puesto lo hace ver como una potencia hídrica a pesar de la escases y el aumento de la contaminación de ésta. Este descenso se debe al aumento de la población y las actividades productivas. [11]

La contaminación ha generado una disminución del oxígeno disuelto (OD) en los ríos Bogotá, Medellín, Alto Cauca, Chicamocha y Sogamoso. [11]

Aunque se cuenta con sistemas de tratamiento de aguas residuales, STAR, de carácter domestico solo el 51% de ellos funciona de forma regular o buena, ya que el funcionamiento y mantenimiento de estos se convierte en un gran problema. [11]

En el 2008 la materia orgánica generada por las industrias de (fabricación de papel, cartón y productos de papel y cartón, elaboración de productos alimenticios y bebidas, fabricación de sustancias y productos químicos) fue de 639.765 ton (1,752 Ton/día), lo que equivale a 17,5 millones de habitantes. [11]. Lo que permite establecer que los residuos provenientes de sectores industriales son

importantes y definitivos en el deterioro de la calidad del recurso hídrico urbano, debido a esto el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial ajustó la reglamentación vigente en materia de vertimientos (Decreto 1594 de 1984), para asegurar un mejoramiento en la calidad, concentración, cantidad y cargas contaminantes que son vertidos a los recursos hídricos, lo que ayudara a evitar el deterioro de la salud en la población Colombiana y, por ende, la disminución de los costos asociados a la contaminación del recurso; los cuales, se calcula, ascienden a los \$1.015.744.545 de pesos al año. [14]

1.4 AGUA RESIDUAL

Debido a la contaminación por fenómenos naturales, humana e industrial las propiedades del agua se ven afectadas diariamente, por lo que se hace necesario implementar tecnologías para evaluar las características de las fuentes de agua y así tener una idea de su calidad y posible reutilización. [15]

Para prevenir y controlar la contaminación en Colombia, se han identificado los principales causantes de este problema, teniendo en cuenta que el desarrollo económico se lleva a cabo por la realización de actividades industriales, manteniendo siempre presente el desarrollo sostenible. [14]

1.5 CONTAMINACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA

La contaminación de los cuerpos de agua se debe a diferentes causas, el mayor aporte a ésta lo hace el ser humano y en menor importancia los fenómenos naturales. [16]

Las actividades del campo e industriales aportan gran cantidad de residuos orgánicos que son recibidos por los cuerpos de agua directamente o por escorrentía superficial. [16]

Según Bechmann (1998) , la escorrentía es el caudal superficial generado como consecuencia de la lluvia, por lo que presenta una gran variedad en su caudal y su composición. El agua de lluvia es una fuente considerable de contaminantes presentes en la atmósfera y cuando ésta entra en contacto con la superficie arrastra la contaminación (metales pesados, hidrocarburos, plomo, caucho y sólidos suspendidos) al sistema de alcantarillado. El agua aumenta su concentración de contaminantes como consecuencia del arrastre y resuspensión de los sedimentos acumulados. [17]

Entre el 60 y el 90% del agua potable consumida en los hogares se convierte en agua residual, que puede venir de cualquier sitio donde se realice una actividad

por el ser humano. Tienen un alto contenido de sólidos que son los principales contribuyentes de materia orgánica, estos contaminantes contienen generalmente los siguientes componentes: materia orgánica como carbohidratos, grasas y aceites. Compuestos nitrogenados como nitrógeno orgánico, en forma de proteínas, urea y nitrógeno amoniacal, fósforo. [16]

El agua residual industrial tiene diferentes características dependiendo de la actividad económica de esta, la composición de sus desechos en su mayoría son materia orgánica (industria alimenticia) y agua de alto contenido en nutrientes (granjas, industrias y cultivos). [16,17]

Las aguas residuales son la combinación de líquidos que transportan los residuos procedentes de establecimientos públicos y residencias, y se le suman las aguas subterráneas, superficiales y pluviales. Los procesos de depuración se aplican para proceder a la eliminación de la carga contaminante de las aguas residuales. [17]

1.6 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL

1.6.1 Materia orgánica

La materia orgánica consume el oxígeno del agua, crea olores y gustos desagradables y favorece la putrefacción de las aguas. La falta de oxígeno genera una disminución de la vida acuática. La materia orgánica biodegradable se determina por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), que es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. La materia orgánica oxidable se determina por la demanda química de oxígeno (DQO) que es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato de potasio en medio ácido). [11,18]

1.6.2 Sólidos suspendidos

Los sólidos en suspensión precipitan en el fondo o se depositan en las orillas, y se descomponen causando olores y la disminución del oxígeno en el agua. [18]

1.6.3 Sólidos disueltos

Son los materiales que permanecen en el agua, luego de que esta es filtrada para determinar los sólidos suspendidos. Los sólidos disueltos en el agua resultan de la acción solvente del agua, luego de actuar sobre sólidos, líquidos y gases. [16]

1.6.4 Temperatura

La temperatura tiene efectos en las características del agua como disminución del oxígeno disuelto, lo que causa que los organismos acuáticos sufran, se disminuya la capacidad de degradación natural del agua y aumenta la acción de las bacterias sobre ésta. En las agua con mayor temperatura se dificulta el proceso de tratamiento de depuración y su disposición final. [4,18]

1.6.5 Color

La aguas residuales domesticas por lo general son de color gris a medida que el agua envejece este color oscurece hasta volverse negro, esto se debe a los sulfuros metálicos formados. El color presente en las aguas residuales industriales es un indicador del origen de la contaminación así como del buen funcionamiento del tratamiento previo al que son sometidas. [4]

El color de los ríos se debe a la absorción de algunas longitudes de onda de la luz y reflejo de las restantes por parte de los componentes presentes en el agua. La incidencia del sol sobre el agua es interferida por que el color que ésta tenga, esto ocasiona la disminución de la acción fotosintética y puede interferir en la absorción de oxígeno de la atmosfera. [18]

1.6.6 Compuestos inorgánicos tóxicos

Los compuestos inorgánicos son peligrosos para los peces y los diferentes microorganismos acuáticos hasta en concentraciones muy bajas, estos compuestos son de difícil eliminación para las plantas de tratamiento y se acumulan en el sistema biológico. [18]

1.6.7 Compuestos orgánicos tóxicos

Los compuestos orgánicos se clasifican, según su degradación, en biodegradables o no. Las sustancias biodegradables son aquellas utilizadas como alimento por los microorganismos en cierto tiempo. Los más comunes son azúcares, grasas, proteínas, alcoholes y aldehídos. La degradación de las sustancias orgánicas es realizada por los microorganismos a través de los procesos bioquímicos de oxidación o reducción. [16]

1.6.8 Nutrientes vegetales inorgánicos

Los nutrientes como nitratos y fosfatos son sustancias que si se encuentran en grandes cantidades en el agua provocan un crecimiento excesivo de algas y otros organismos que provocan eutrofización en el agua. [16]

1.6.9 Microorganismos

Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades, estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Las bacterias son principalmente de dos tipos: a) Bacterias que ayudan a la degradación de la materia orgánica cuando los residuos orgánicos se mueven aguas abajo. b) Bacterias que son patógenas, no solamente para otras bacterias, sino también para los humanos. [16,18]

1.6.10 Detergentes

Los detergentes son usados y existen en las aguas residuales. Disminuyen la tensión superficial del agua y favorecen la formación de espumas, aun en bajas concentraciones, además inhiben la actividad biológica y disminuyen la solubilidad del oxígeno en el agua. Contienen gran cantidad de fósforo lo que causa la eutrofización en el agua. [4]

1.6.11 Acidez

La presencia de acidez en el agua se debe a la disolución del CO_2 atmosférico, al proceso de oxidación biológica de materia orgánica o en la descarga de aguas residuales industriales. Puede tener un efecto destructor o alterador de la flora y fauna de los cuerpos de agua receptores y un efecto corrosivo de gran importancia. [4]

1.6.12 Alcalinidad

La alcalinidad del agua es una medida de su capacidad de neutralizar ácidos. Las concentraciones más comunes en aguas residuales domésticas son de 50 a 200 mg CaCO_3/L . La alcalinidad se genera por presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o de amonio, siendo la causa más común los bicarbonatos de calcio y magnesio. Su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir cambios bruscos de pH la hace importante en el tratamiento químico de aguas residuales, en los procesos anaerobios. [4]

1.6.13 Grasas y aceites

Estas sustancias causan un efecto iridiscente en el agua en la cual están presentes, problemas en el mantenimiento de las plantas de tratamiento e interferencias con las actividades biológicas pues son difíciles de degradar, estas sustancias están compuestas de carbono, hidrógeno y oxígeno las cuales flotan en el agua. [4]

1.6.14 Olor

Las aguas residuales frescas tienen un olor característico desagradable, mientras que las aguas residuales putrefactas tienen un olor muy ofensivo, producido por H_2S proveniente de la descomposición anaerobia de los sulfatos o sulfuros, aminas, amoníaco, diaminas, mercaptanos y escatol. Las aguas residuales industriales tienen, a veces, olores característicos específicos del proceso industrial del cual provienen. [4]

Las fuentes del olor del agua son los minerales, metales, sales del suelo, productos finales de reacciones biológicas, y aguas residuales domésticas o industriales. [16]

1.6.15 pH

El pH tiene una gran incidencia en las transformaciones químicas que ocurren en el agua y en los tratamientos de depuración para ésta, las aguas que tienen pH bajo no son fáciles de tratar en procesos biológicos, pueden cambiar la biota de los cuerpos de agua y en algunos casos ser fatales para los microorganismos. Un pH ácido en las aguas naturales se puede deber a el CO_2 disuelto desde la atmósfera o provenir de los seres humanos. El pH ideal para la vida biológica y aplicación de tratamientos de depuración es de 6,5 a 8,5. [4,16]

1.6.16 Oxígeno disuelto

Un alto contenido de oxígeno disuelto es indispensable para la vida, las aguas superficiales limpias generalmente están saturadas de éste, cuando su concentración baja es un indicador de contaminación por materia orgánica, putrefacción, mala calidad del agua e inestabilidad para las diferentes formas de vida. [11]

1.6.17 Nitrógeno total

La presencia de nitrógeno en el agua hasta ciertas concentraciones es benéfica y es un nutriente vital, pero si la presencia de éste es muy alta puede causar eutrofización. Está presente en las aguas naturales y contaminadas formando diferentes compuestos. Su cuantificación se lleva a cabo generalmente por el método Kjeldahl que determina el nitrógeno orgánico y amoniacal, la determinación de nitratos y nitritos se realiza por separado. [11]

1.6.18 Metales

Los metales son elementos que se encuentran en el agua, se clasifican en tóxicos (plomo, mercurio, cadmio, arsénico y zinc) conocidos por el efecto que causan en el ser humano así se encuentren en pequeñas cantidades y no tóxicos (sodio, hierro y manganeso). Los metales se concentran en la cadena alimenticia y se biomagnifican al pasar de un nivel trófico a otro. [16]

1.7 TRATAMIENTOS PARA EL AGUA RESIDUAL

Anteriormente se consideraba que no era necesario realizar tratamientos de depuración a los cuerpos receptores de agua, pues se creía que sus procesos de autopurificación eran suficientes para tolerar la contaminación presente en el agua. Pero la reglamentación ha cambiado en los últimos años, ya que ahora se piensa que cualquier efluente de agua residual requiere de un tratamiento mínimo sin importar la capacidad de eliminación propia de contaminantes que tenga el cuerpo receptor. Esta necesidad se evidencio por la aparición de enfermedades infecciosas que se generaron por el mal manejo de las aguas residuales. [16]

Tomando como fundamento los procesos de autopurificación naturales de los cuerpos de agua, se implementan tecnologías para inducir estos procesos de forma artificial y así disminuir la contaminación del agua. [16]

El tratamiento de las aguas residuales se divide en primario, secundario y terciario, según el grado de eliminación de contaminantes al cual llegue. [16]

1.7.1 Tratamiento primario

El tratamiento primario se basa en remover material solido presente en el agua residual, y se basa en dos principios de separación mecánica (rejilla) y separación hidráulica (sedimentador). Las rejillas atrapan el material de mayor tamaño como hojas o palos, los sedimentadores eliminan sólidos orgánicos suspendidos y los desarenadores disminuyen la velocidad del agua y así permiten la sedimentación de arenas y otros sólidos inorgánicos. [16,4]

Un tratamiento típico debería remover aproximadamente la mitad de los sólidos suspendidos del agua residual tratada. El tratamiento primario es de fácil operación y bajo costo, pero su eficiencia es baja; por lo que se obtiene agua residual que no cumple con las normas de calidad de agua establecidas para estos efluentes. [16,4]

1.7.2 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario está basado principalmente en procesos biológicos que simulan la autodepuración natural, por medio de la transformación biológica de sólidos disueltos y orgánicos coloidales a biomasa que luego se remueve por sedimentación, esta conversión es realizada por microorganismos mediante un proceso de biooxidación. [16, 19,4]

Para poner en contacto los microorganismos con los compuestos orgánicos se utilizan 2 métodos: el primero se basa en la suspensión de la biomasa (microorganismos) en el agua residual llamado lodos activados, el proceso de conversión (reducción biológica) se acelera realizando una recirculación de una parte de la biomasa manteniendo en contacto los microorganismos con el agua residual. El segundo consiste en pasar el agua residual por finas películas de biomasa la cual está atrapada a superficies solidas, aunque hay varias formas de realizarlo el más común es llamado filtros percoladores, donde se utiliza un material sólido que incrementa el área superficial de contacto y ayuda al crecimiento de la biopelícula. Cuando la biopelícula está madura se despega de la superficie solida y es llevada con la corriente de agua a un clarificador secundario [16,4]

El tratamiento secundario produce exceso de biomasa que es biodegradada a través de mecanismos catabólicos endógenos de otros microorganismos, tienen una capacidad de eliminación superior al 90% en sólidos suspendidos y materia orgánica. [16, 19, 4]

Existe otro mecanismo de limpieza llamado lagunas de oxidación donde el oxígeno necesario es tomado del proceso de fotosíntesis de las algas y de la reaeración superficial, el oxígeno difícilmente penetra el fondo de la laguna, los sólidos sedimentan y se descomponen anaeróbicamente. [16,4]

1.7.3 Tratamiento terciario

En el tratamiento terciario de efluentes residuales se realizan varios procesos al agua proveniente del tratamiento secundario. Los contaminantes eliminados en el tratamiento terciario se clasifican en: de (1) sólidos en suspensión, (2) materiales inorgánicos disueltos y (3) compuestos orgánicos disueltos. [20]

El tratamiento terciario se lleva a cabo principalmente utilizando procesos físicos, químicos y no los biológicos, para remover toda la demanda bioquímica de oxígeno, el nitrógeno y el fósforo. Se precipita el fósforo al hacerlo reaccionar con cal, alumbre y cloruro de hierro. Se utilizan filtros de arena fina y carbón activado

para eliminar pequeñas partículas y sustancias químicas disueltas. El nitrógeno se convierte en amoníaco y se libera al aire en torres depuradoras. [21]

1.8 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS: AEROBIO Y ANAEROBIO

Los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales son realizados para lograr la estabilización y remoción de los contaminantes como materia orgánica biodegradable coloidales o disueltas, la eliminación se realiza por la conversión en gases que escapan a la atmosfera y biomasa extraíble mediante sedimentación. La actividad biológica también se usa para remover nitrógeno y fosforo del agua residual. [4, 19]

Existen cuatro grupos principales de procesos biológicos: procesos aerobios, procesos anóxicos, procesos anaerobios y procesos combinados, aerobios con anóxicos o con anaerobios. Los procesos de tratamiento aerobio se realizan en presencia de oxígeno, los procesos anaerobios se realizan en ausencia de oxígeno y en los procesos anóxicos se remueve nitrógeno mediante la conversión de nitrato en nitrógeno gaseoso en ausencia de oxígeno. [4,19]

1.8.1 Proceso Aerobio

En los procesos aerobios las bacterias heterótrofas (obtienen carbono de compuestos orgánicos) mediante oxidación toman el carbono necesario de la materia orgánica coloidal y disuelta, la trasforman en productos más estables como $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ y nuevas células microbianas que se pueden eliminar por sedimentación. [22]. El oxígeno libre es reducido siendo este el único aceptador final de electrones en un proceso de respiración de oxígeno. Todos los organismos que usan oxígeno libre como aceptador de electrones son aerobios. En la forma más elemental:

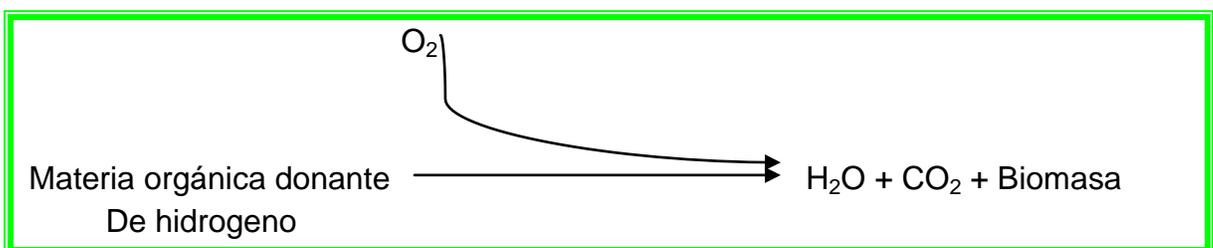


Figura 1. Diagrama elemental proceso aerobio

Fuente: Romero Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Ed. 1, pág. 229

Las reacciones del metabolismo microbioal se representan en el proceso de oxidación aerobia por las siguientes ecuaciones. [4]

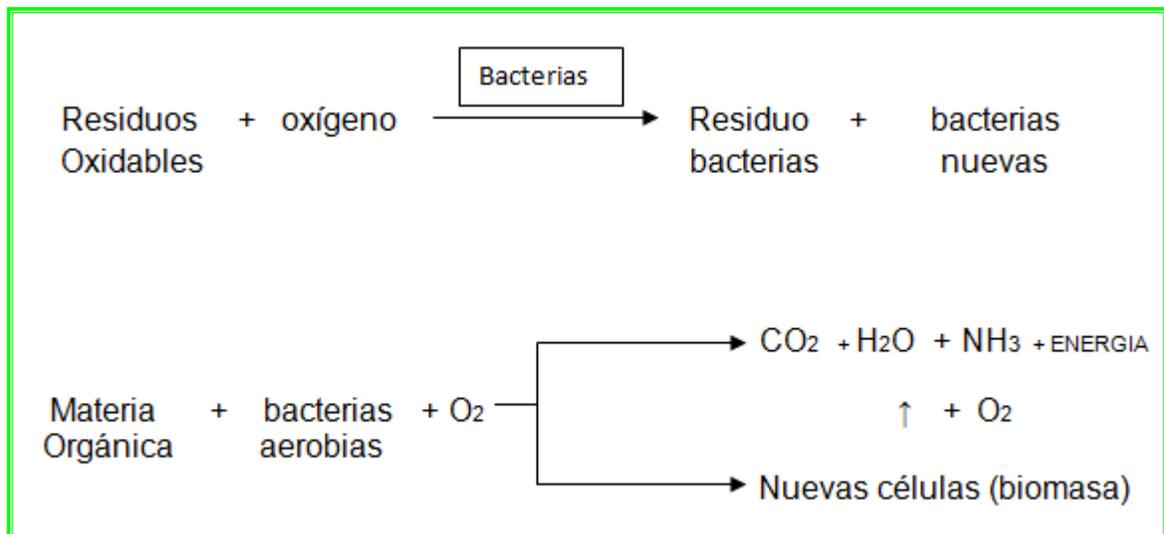


Figura 2. Ecuaciones del proceso de oxidación aerobia

Fuente: Romero Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Ed. 2, pág. 230.

En el tratamiento aerobio las bacterias son los organismos más importantes por ser muy buenos oxidadores de la materia orgánica además de que se reproducen muy bien en las aguas residuales, tienen la capacidad de crear una capa floculenta gelatinosa de muy buenas características para la remoción de la materia orgánica. [4]

En la oxidación biológica aerobia ocurren reacciones de oxidación biológica en las que el oxígeno molecular libre es vital para los organismos aerobios, el oxígeno es el aceptador final de electrones en un proceso en el que los electrones libres del donante oxidable son transportados al oxígeno molecular para obtener energía para el crecimiento de los organismos aerobios. El oxígeno molecular libre es agregado a la materia orgánica (sustrato) por lo que ocurre la oxidación o mineralización del residuo. Esta reacción es eficaz pues genera grandes cantidades de energía, que es almacenada preferiblemente en la biomasa obtenida, los residuos que se obtienen de esta reacción son compuestos estables de bajo contenido energético. [4]

El proceso aerobio se realiza con el fin de conseguir la energía que se necesita para la síntesis de tejido celular nuevo, si hay carencia de materia orgánica el

tejido celular se respirará endógenamente y se convertirá en productos gaseosos y en energía para mantenimiento. [4]

Las tres reacciones esenciales: catabolismo, anabolismo y autólisis ocurren simultáneamente y suelen describirse así: [4]

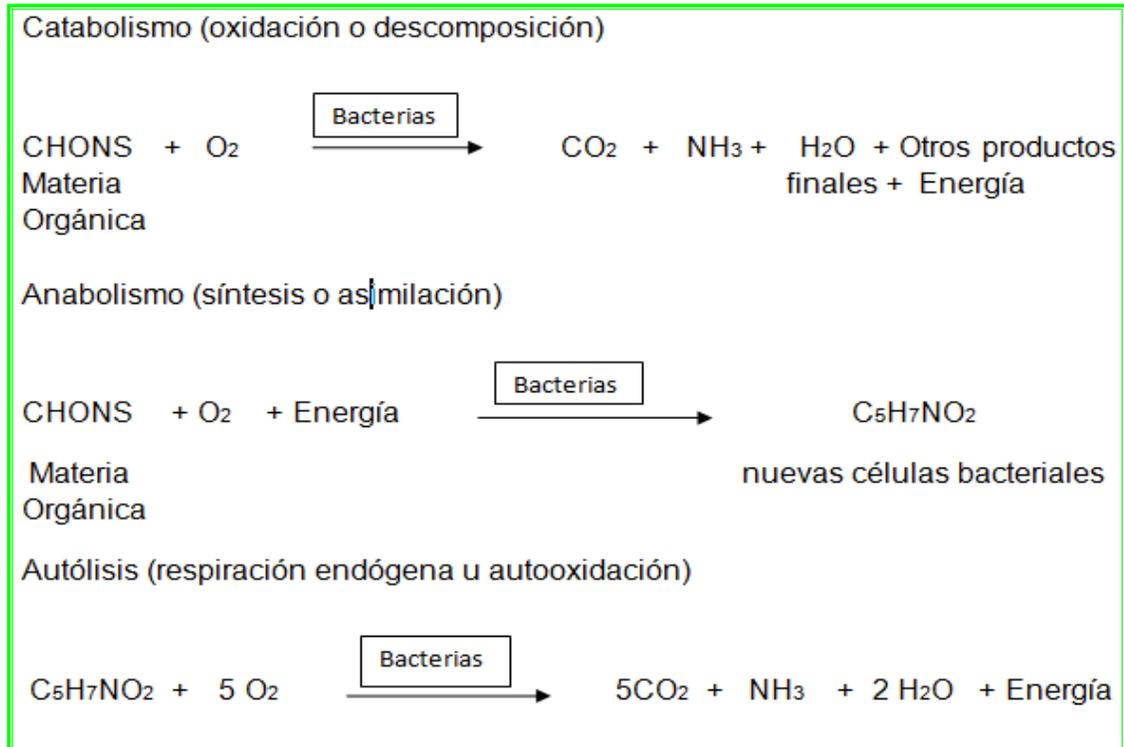


Figura 3. Reacciones esenciales del proceso aerobio

Fuente: Romero Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Ed. 2, pág. 231-232.

De la ecuación anterior se deduce que para oxidar 113 gramos de biomasa se requieren 160 gramos de oxígeno; es decir, que para oxidar un gramo de biomasa se consumen 1,42 gramos de oxígeno. [4]

En la literatura se reporta que generalmente un 77% de la biomasa es biodegradable en sólidos suspendidos volátiles, esto se debe a que no toda la biomasa es susceptible a la descomposición aerobia. [4]

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso aerobio [4]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> . Ausencia de olores. . Mineralización de todos los compuestos biodegradables. 	<ul style="list-style-type: none"> . Tasa alta de síntesis celular y, por consiguiente, alta producción de lodos. . Requiere mucha energía eléctrica para oxigenación y mezcla. . Gran proporción de células en los lodos que hace, en algunos casos, necesaria su digestión, antes de secarlos y disponerlos.

1.8.2 Proceso anaerobio

El proceso anaerobio es menos eficiente en producción de energía que el aerobio, puesto que la mayoría de la energía liberada en el catabolismo anaerobio provienen de la sustancia descompuesta que aún permanece en los productos finales orgánicos reducidos como el metano, generándose una cantidad de biomasa mucho menor que la producida en el proceso aerobio. El proceso se puede representar esquemáticamente como se indica en la figura 4. [4]

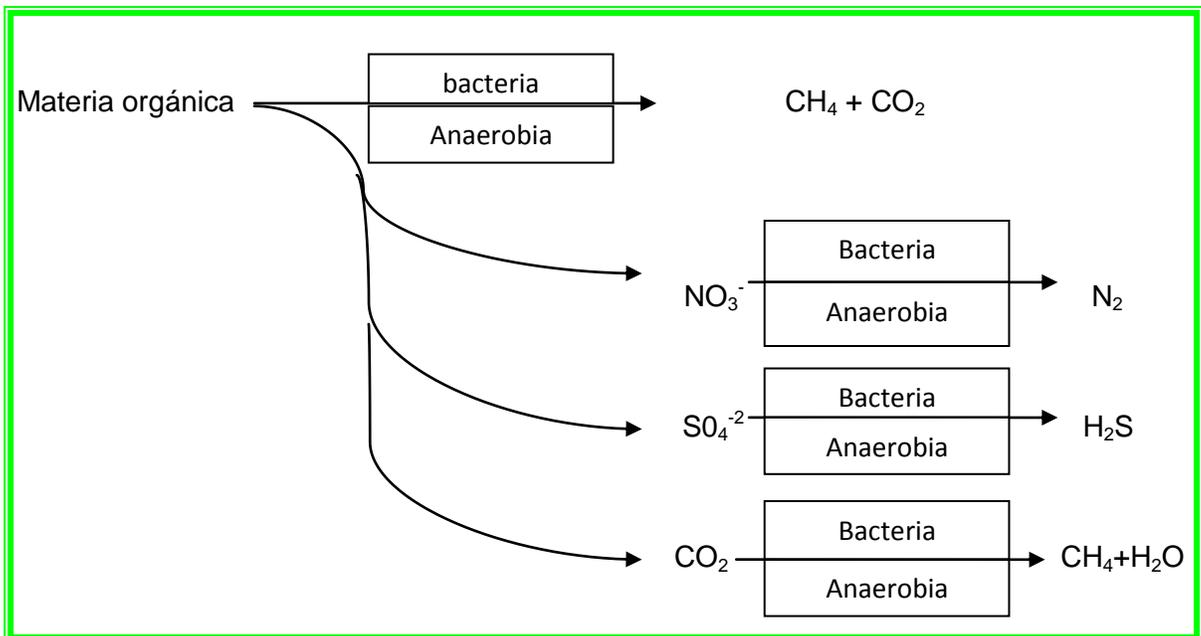


Figura 4. Diagrama simplificado de la oxidación anaerobia

Fuente: tratamiento de aguas residuales teoría y diseño. Ed. 2, pág. 233 [4]

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico en el cual por acción de diferentes microorganismos en ausencia de oxígeno molecular la materia orgánica (carbohidratos, proteínas y lípidos) es degradada por oxidación biológica a productos más sencillos como una mezcla de CH_4 , CO_2 , H_2S , amonio y un producto líquido o sólido remanente que contiene los componentes difíciles de degradar junto con el nitrógeno, fósforo y otros minerales presentes inicialmente en la biomasa. [8,23, 24,25]

En el tratamiento anaerobio ocurren los procesos básicos de la descomposición anaerobia, es decir, desnitrificación de nitratos, respiración de sulfatos, hidrólisis y fermentación acetogénica y metanogénica. El proceso microbio es muy complejo por que ocurren muchas reacciones simultaneas paralelas y en serie, interdependientes entre sí. El proceso anaerobio de descomposición de la materia orgánica está integrado por dos etapas: fermentación de ácidos y fermentación de metano, que ocurren simultáneamente, como se representa en la figura 5. [4]

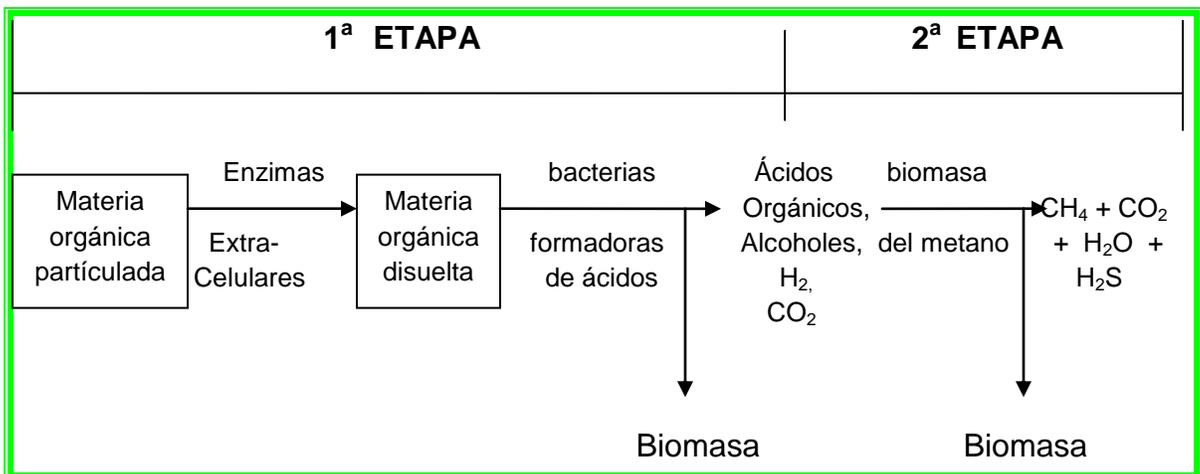


Figura 5. Diagrama elemental del proceso anaerobio

Fuente: Romero Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y diseño. Ed. 2, pág. 235

La fermentación de metano en el proceso de digestión anaerobia, se indica en la figura 5. El esquema supone una serie de tres etapas: 1) hidrólisis, licuefacción y fermentación; 2) formación de hidrogeno y ácido acético; y 3) fermentación de metano; etapas que son realizadas por cinco grupos bacteriales principales, cada uno con metabolismo dependiente de los otros grupos involucrados en el proceso. [4]

Las bacterias fermentativas deben producir y segregar enzimas hidrolíticas para realizar la hidrólisis y licuefacción del material complejo e insoluble. Esta etapa del proceso anaerobio es fundamental y lo puede limitar, por lo que es indispensable

que en el reactor se cuente con un número grande de microorganismos, un sustrato orgánico concentrado, una temperatura y mezcla uniforme. [4]

Como puede verse en la figura 6, los grupos de bacterias fermentativas, acetogénicas productoras de hidrógeno y acetogénicas consumidoras de hidrógeno, producen básicamente hidrógeno, dióxido de carbono y acetato, mientras que las bacterias metanogénicas reductoras de CO_2 y acetoclásticas producen metano. Para mantener una digestión eficiente debe haber producción de metano y mantenerse una concentración baja de hidrogeno. [4]

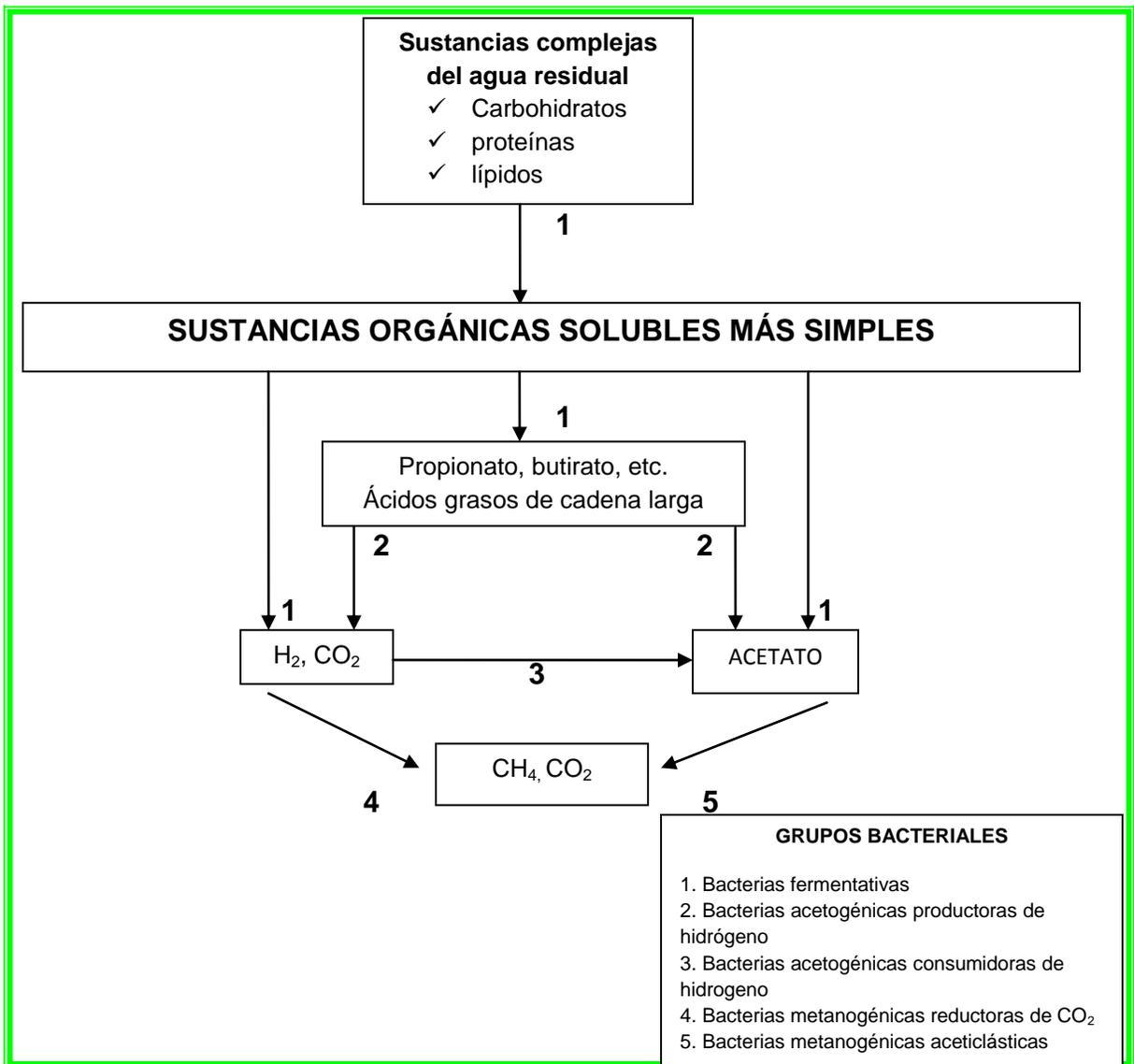


Figura 6. Formación de metano en la digestión anaerobia

Fuente: Romero Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y diseño. Ed. 2, pág. 237 [4]

El CO₂ producido también escapa como gas o es convertido en alcalinidad bicarbonácea. La bacteria del metano es estrictamente anaerobia y se cree que sólo puede usar ácido acético, fórmico, metanol o hidrógeno como fuente de energía. [4]

El proceso de descomposición anaerobia se puede describir en las siguientes fases:

1.8.2.1 Hidrólisis

La hidrólisis de la materia orgánica polimérica a compuestos solubles o monómeros es el paso inicial para la degradación anaerobia en sustratos orgánicos más simples, ya que los microorganismos únicamente pueden utilizar materia orgánica soluble que pueda atravesar su pared celular. Por tanto es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaerobia. La hidrólisis de estas moléculas complejas se lleva a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por los microorganismos hidrolíticos. Las bacterias que producen la hidrólisis pueden ser anaerobias o facultativas, la importancia de estas bacterias radica en que además de proporcionar un sustrato para los grupos posteriores de bacterias, eliminan el oxígeno disuelto que pudiera quedar en la materia orgánica. [8, 23, 24 ,25]

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos de un alto contenido de sólidos. Además la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del pH y de la concentración de los productos de la hidrólisis. [26].

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos:

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia ya que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrogeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso. [26]

La degradación de lípidos en ambientes anaerobios comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.[26]

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis y por tanto, de la degradación anaerobia de determinados sustratos. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaerobios, afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. [8, 26]

1.8.2.2 Etapa Fermentativa o Acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂), y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La cinética del proceso es relativamente rápida y el pH óptimo, bajo. [8,4]

La principal ruta metabólica de degradación de glucosa para formar ácidos orgánicos, tiene como principal intermediario el piruvato. La fermentación de azúcares se realiza por diversos tipos de microorganismos. En función de cada organismo, la ruta metabólica y los productos finales son diferentes. Los principales microorganismos asociados a la degradación de la glucosa son del género *clostridium* y convierten la glucosa en butírico, acético CO₂ y H₂. La glucosa se convierte en piruvato, y el piruvato se desdobra a Acetil-CoA y CO₂. El Acetil-CoA se reduce en los productos de fermentación empleando como transportador de electrones el NADH derivado de las reacciones glucolíticas. [26]

La fermentación de aminoácidos es un proceso rápido, los productos de la fermentación de estos y otras moléculas hidrogenadas son ácidos grasos de cadena corta, succínicos, amonivalerico y H₂. De la oxidación de ácidos grasos de cadena larga se obtienen ácidos grasos de cadena corta por el mecanismo de β-oxidación. Los ácidos grasos libres son introducidos en la célula a través de la pared celular y una vez en su interior, son transformados en el correspondiente tio-ester-CoA produciendo principalmente ácido acético. [26]

1.8.2.3 Etapa Acetogénica

Algunos productos de la fermentación como H_2 y ácido acético pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, algunos como el etanol, ácidos grasos volátiles como valeriato, butirato, propionato, etc y (algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, acetato y H_2 por las bacterias acetogénicas. [26]

Los procesos acetogénicos son energéticamente difíciles, por lo que necesitan ser ayudados por los organismos metanogénicos u otros organismos consumidores de hidrógeno. [8]

El hidrógeno molecular es el principal inhibidor de la acetogénesis por causa de acumulación de sustratos. Los microorganismos homoacetogénicos pueden crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como la mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario de la bacterias acetogénicas, estas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. [25,26]

1.8.2.4 Etapa Metanogénica

Esta etapa es el último paso del proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica, la mayor parte de la energía química contenida en el sustrato (monocarbonados o con 2 átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, metanol, H_2/CO_2 y algunas metilaminas) es convertida en metano por actuación de las bacterias metanogénicas, estas bacterias necesitan condiciones medioambientales rigurosas para su desarrollo y de elementos o de compuestos como: vitaminas, trazas minerales no usuales (como Ni y Co), AGV y cofactores específicos. [24]

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea* y tienen características comunes que lo diferencian del resto de procariontes. Un ejemplo es que todos ellos poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación del metano. [26]

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. [26]

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir del acetato a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, solo dos

géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tiene especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanothrix*. [8, 26] Las principales reacciones metanogénicas se recogen en la siguiente figura.

Metanogénesis acetoclástica	
Acetato + H ₂ O	→ HCO ₃ ⁻ + CH ₄ -31,0
Metanogénesis a partir de otros sustratos	
Fórmico	4HCOOH → CH ₄ + 3CO ₂ + 2H ₂ O
Metanol	4CH ₃ OH → 3CH ₄ + CO ₂ + 2H ₂ O
Trimetil- amina	4(CH ₃) ₃ N + 6H ₂ O → 9CH ₄ + 3CO ₂ + 4NH ₃
Dimetil-amina	2(CH ₃) ₂ NH + 2H ₂ O → 3CH ₄ + CO ₂ + 2NH ₃
Monometil-amina	4(CH ₃) NH ₂ + 2H ₂ O → 3CH ₄ + CO ₂ + 4NH ₃ . [27]
Reacciones hidrogenotróficas	
	ΔG° (KJ)
4H ₂ + H + 2HCO ₃ ⁻	→ Acetato + 4H ₂ O -104,6
4H ₂ + 4S ⁰	→ 4HS ⁻ + 4H ⁺ -112
4H ₂ + 2HCO ₃ ⁻ + 4H ⁺	→ CH ₄ + 3H ₂ O -135,6
4H ₂ + 4SO ₄ ²⁻ + H ⁺	→ HS ⁻ + 4H ₂ O - 151,9
4H ₂ + 4 fumarato	→ 4 succinato -344,6
4H ₂ + NO ₃ ⁻ + 2H ⁺	→ NH ₄ ⁺ + 3H ₂ O -599,6
Interconversión formiato-hidrogeno	
H ₂ + HCO ₃ ⁻	→ formiato + H ₂ O -1,3

Figura 7. Reacciones metanogénicas del proceso anaerobio [26]

En términos de DQO, la producción de metano en la digestión anaerobia fue esquematizada por como se indica en la figura 8. [4]

Según dicho esquema, aproximadamente un 72% del metano formado proviene de la descomposición del acetato por las bacterias acetoclasticas, un 13% del ácido propiónico y un 15% de otros productos intermedios. Los porcentajes reales serán, posiblemente, diferentes para distintos residuos; sin embargo, la mayor parte del metano producido provendrá de la fermentación del ácido acético, el cual es el ácido predominante en la fermentación de carbohidratos, proteínas y grasas. Por otra parte, el ácido propiónico se forma principalmente durante la fermentación de carbohidratos y proteínas. Por ello, en el proceso son muy importantes las bacterias que utilizan ácido acético y ácido propiónico. [4]

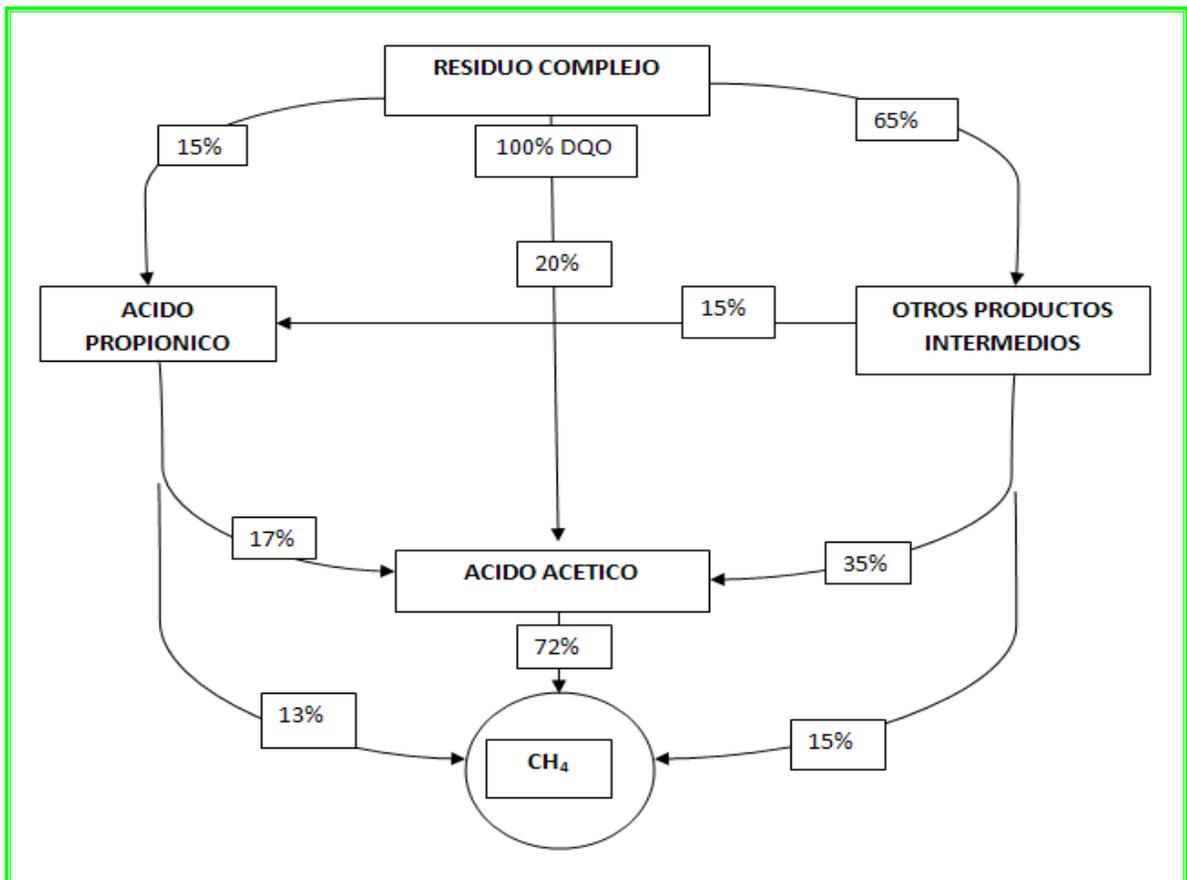


Figura 8. Trayectorias de fermentación de metano

Fuente: Romero Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y diseño. Ed. 2, pág. 239 [4]

Todas las bacterias metanogénicas son de crecimiento muy lento y, por lo tanto, el tiempo de retención celular debe ser lo suficientemente largo para permitir su crecimiento e impedir su extracción del sistema. Por lo regular se mencionan

tiempos de retención celular de 2 a 20 días, con pH de 6,8 a 7,4 y se considera que la fermentación metanogénica controla la tasa del proceso. [4]

Las ecuaciones verbales que resumen el proceso anaerobio, incluyendo crecimiento, son:

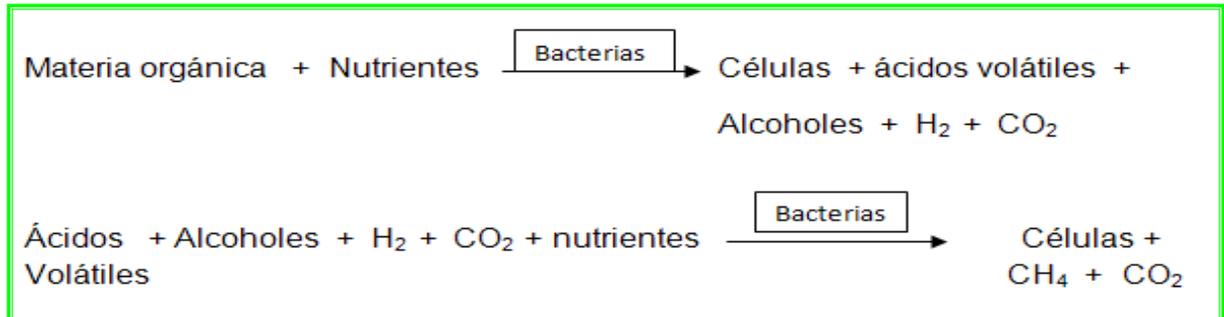


Figura 9. Ecuaciones que resumen el proceso anaerobio.

Fuente: Romero Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y diseño. Ed. 2, pág.238 [4]

Las condiciones óptimas para un proceso anaerobio eficiente son las siguientes: 1) nutrientes suficientes; 2) pH entre 6,5 y 7,6; 3) temperatura en el intervalo mesófilico de 30 – 38 °C o en el intervalo termófilico de 50 – 60 °C; 4) ausencia de oxígeno y 5) ausencia de sustancias tóxicas. [4]

1.9 PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN EL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO ANAEROBIO

1.9.1 Temperatura

La temperatura es un parámetro que afecta directamente el crecimiento de los microorganismos involucrados en este proceso, ya que de ella depende su velocidad de crecimiento, su capacidad catalítica y la difusión del sustrato hacia las células. En los procesos de digestión anaerobia las mayores producciones de biogás se logran con un aumento de temperatura pues esto aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y a su vez acelera el proceso de la digestión. [26]

Para asegurar una temperatura homogénea en el reactor es necesario contar con un sistema de agitación y un controlador de temperatura adecuada, para así controlar cambios de temperatura bruscos que pueden desestabilizar el proceso. [26]

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios: psicófilico (por debajo de 25°C), mesófilico (entre

25 y 45°C) y termofílico (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{Max}) mayor conforme aumenta el rango de temperaturas. La temperatura es una de las variables ambientales primordiales del proceso pues indica en que márgenes es viable, ya que afecta a todos los microorganismos de diferente manera llegando incluso a perjudicar la integridad celular de la población microbiana. [4, 24].

Los aspectos fisicoquímicos del proceso se ven afectados por la temperatura. Si ésta aumenta la solubilidad de los gases baja favoreciendo la transferencia líquido-gas, lo que disminuye la toxicidad en el crecimiento de los microorganismos por efecto de gases como NH_3 , H_2 y H_2S . La disminución de la solubilidad del CO_2 causa un aumento en el pH, lo que generaría en fangos de elevada concentración de amonio, posibles situaciones de inhibición por NH_3 . La solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura lo que genera que los microorganismos tengan más facilidad de acceder a la materia orgánica y así aumentar la velocidad del proceso. Si la temperatura a la que se realiza el proceso es alta se disminuye la viscosidad de los sólidos y semisólidos implicando menores necesidades de agitación. [4, 24, 25]

1.9.2 pH y Alcalinidad

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaerobia presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad entre los siguientes valores: [26]

- Fermentativos: entre 7.2 y 7.4
- Acetogénicos : entre 7,0 y 7,2
- Metanogénicos : entre 6,5 y 7,5

El pH no debe bajar de 6 ni subir de 8, si se desea que el proceso tenga un buen desarrollo. El valor del pH en el reactor puede determinar la producción de biogás y su composición, si el pH disminuye a valores menores a 6 el biogás generado es muy pobre en metano y por lo tanto tendrá menores cualidades energéticas. [26]

Las variaciones de pH en el sistema se pueden considerar mas como el reflejo de un desequilibrio que como la causa del mismo, aunque es una de las variables utilizadas para el diagnóstico del proceso no se puede considerar como una de control pues es muy lenta y está influenciada por muchos fenómenos. El pH del proceso está relacionado con la presencia de ácidos grasos volátiles y por la distorsión de alguna condición ambiental, las bacterias metanogénicas se inhiben temporalmente, aunque la flora acidogénica (menos sensible) sigue produciendo

ácidos, H_2 y CO_2 , con la consiguiente disminución del pH y un mayor perjuicio a la flora metanogénica. Este fenómeno es denominado como la 'acidificación' del reactor y habitualmente es de difícil recuperación sin intervención. La acumulación de los ácidos grasos volátiles provoca un descenso en el pH que será más o menos acusada en función de la alcalinidad del medio. [24,26]

El pH afecta los equilibrios químicos del proceso desplazándolos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Como el caso del equilibrio ácido-base del amoníaco y del ácido acético: si aumenta el pH se favorece la formación del amoníaco, que en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a pH bajo se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato. [26]

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio. En el rango de pH del proceso de digestión anaerobia, el principal equilibrio que controla la alcalinidad es el dióxido de carbono/bicarbonato. Estudios previos han demostrado que valores de la alcalinidad del bicarbonato por encima de 2500 mg/L, aseguran un buen control del pH y una adecuada estabilidad del sistema. [26]

1.9.3 Nutrientes

El proceso de digestión anaerobia tiene una demanda baja de nutrientes debido a la baja producción de biomasa que presentan los microorganismos anaerobios, esto es una ventaja sobre los procesos aerobios. Para el crecimiento de la biomasa es necesaria la presencia de nutrientes minerales y compuestos orgánicos, como vitaminas, además de una fuente de carbono y de energía. Estos nutrientes se pueden dividir en macronutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo, potasio y azufre) y micronutrientes (cobalto, cobre, hierro, molibdeno, níquel, selenio, tungsteno y zinc). Diversos autores han estudiado la relación necesaria entre los nutrientes mayoritarios considerando una relación C: N entre 15-30:1, si esta relación es demasiado baja los microorganismos no podrán metabolizar la materia orgánica, y si es demasiado alta, hay un exceso de nitrógeno que se acumula en forma amoniacal e inhibe el proceso y una relación C: P entre C: P 75:11 o 3:1. [8, 26]

1.9.4 Potencial redox

Conviene mantener el valor del potencial redox por debajo de -300mV o -330mV para asegurar un ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad. [26]

1.9.5 Tóxicos e inhibidores

En la digestión anaerobia los niveles tóxicos e inhibitorios documentados difieren considerablemente, esto se debe a la complejidad de los procesos de digestión anaerobia, donde mecanismos como antagonismo, sinergismo, aclimatación, etc. Pueden afectar significativamente el fenómeno de inhibición. El oxígeno es la principal sustancia tóxica de la digestión anaerobia, ya que los microorganismos metanogénicos son estrictamente anaerobios y se dice que concentraciones de 0,01 ppm inhiben completamente su crecimiento. El efecto tóxico de una sustancia sobre los microorganismos puede disminuir por la aclimatación de estos al tóxico. Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso. [8,26]

1.9.6 Ácidos Grasos Volátiles

La concentración de ácidos grasos volátiles, productos intermedios mayoritarios del proceso anaerobio, es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso, un aumento en la concentración de ácidos grasos volátiles significa una desestabilización del proceso y como consecuencia una disminución en la producción del biogás. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. Algunos estudios realizados evidencian que el incremento de la concentración de ácidos grasos volátiles, en la mayoría de los casos, es el resultado y no la causa del descenso en la actividad metanogénica, puesto que indican que la relación velocidad de alimentación orgánica a población metanogénica es superior a la adecuada o que la metanogénesis está inhibida por alguna otra causa. [26]

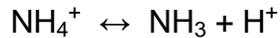
1.9.7 Hidrogeno

Si hay acumulación de hidrogeno en el reactor ocurrirá la inhibición de la acetogénesis y por consiguiente acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono. La presencia de este se debe a que es un compuesto intermedio del proceso anaerobio. [26]

1.9.8 Nitrógeno amoniacal

En la etapa de hidrólisis el nitrógeno orgánico es transformado a nitrógeno amoniacal, esta especie del nitrógeno en concentraciones adecuadas sirve como nutriente para el proceso pero si está en exceso puede limitar el crecimiento bacteriano. [26]

El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio (NH_4^+) y del amoníaco (NH_3). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH, tal y como indica la ecuación de equilibrio: [26]



Aparentemente de estas dos especies la que inhibe el proceso es el amoníaco libre pues experimentalmente se ha comprobado que la inhibición por amonio aumenta a pH alcalinos. La concentración de amonio libre depende de la concentración del sustrato, de la relación C: N, de la capacidad tamponadora del medio y de la temperatura de digestión. [26]

1.9.9 Sulfatos y sulfuros

El proceso anaerobio puede inhibirse por altas concentraciones de sulfatos, especialmente la etapa metanogénica. Cuando hay sulfatos las bacterias metanogénicas compiten con las bacterias sulfatorreductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), teniendo las últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. La proporción de sulfhídrico y metano en el biogás producido depende de la competencia de las dos clases de bacterias. [26]

Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a la presencia de sulfuros, en una concentración de 50 mg/L puede ser tóxico para los microorganismos metanogénicos si no están aclimatadas a él, las bacterias acidogénicas y acetogénicas también pueden ser inhibidas por los sulfuros. La forma no ionizada puede ser la más tóxica, por lo que la inhibición se favorece a pH bajos y bajas temperaturas. [26]

Por tanto, la inhibición tiene dos etapas, la primera debida a la competición por el sustrato entre los microorganismos metanogénicos y sulfato-reductores y la segunda es una inhibición directa del crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles. [26]

1.9.10 Cationes y metales pesados

A bajas concentraciones los cationes de metales alcalinos y alcalino-térreos tienen un efecto estimulador en la actividad de las bacterias. A partir de un nivel de concentración, pueden proporcionar toxicidad provocando una disminución de la velocidad de crecimiento. [26]

La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan toxicidad a menor concentración. El orden de

toxicidad de los metales pesados es $Ni > Cu > Cr (IV) \approx Cr > Pb > Zn$. [4]. Solo 1 mg/L de los metales anteriormente mencionados produce efectos inhibitorios.

Si se logran aclimatar los microorganismos a los cationes tóxicos en forma gradual, el efecto toxico es menor. Al precipitar metales pesados en el reactor por la presencia de sulfuros, disminuye la inhibición de estos sobre los microorganismos, por lo que se pueden tolerar elevadas concentraciones de estos metales. [26]

Cuando se presentan combinaciones de estos cationes, el efecto que se produce es más complejo. Algunos actúan antagónicamente, reduciendo la toxicidad, y otros actúan sinérgicamente aumentándola. [26]

En el caso de aguas residuales industriales las elevadas concentraciones de metales suelen ser la causa de la ineficacia del proceso anaerobio. [26]

1.9.11 Otros inhibidores

Debido a que la etapa de fermentación metánica tiene etapas realizadas por microorganismos estrictamente anaerobios, es obvio que el oxígeno es un tóxico mas del proceso. Parece que concentraciones del orden de 1 $\mu\text{g/L}$ son inhibitorias. [26]

1.9.12 Velocidad de carga orgánica y tiempo de retención

El tiempo de retención es la razón existente entre el volumen del biodigestor y la carga diaria de alimentación. Las bacterias requieren vivir cierto tiempo para degradar la materia orgánica siendo determinado por el tiempo de retención, existen dos tipos de tiempo de retención: tiempo de retención hidráulico (TRH) y tiempo de retención de sólidos (TRS), normalmente se trabaja con tiempo de retención de 10 a 15 días, ello depende de varios factores como el tipo de sustrato, el volumen del biodigestor, temperatura, etc. En los sistemas de mezcla completa, el tiempo de retención hidráulico (TRH) coincide con el celular, por lo que el tiempo de retención deberá ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana. Al aumentar el TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada así como la producción de metano, aunque este último valor comenzará a disminuir una vez alcanzado el óptimo. [26,27]

La velocidad de carga orgánica (VCO) es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones

volumétricas de biogás aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor. [26]

1.9.13 Agitación

La agitación permite mantener la mayor cantidad de alimento en contacto con las bacterias, reducir el volumen ocupado por el material orgánico e inorgánico sedimentables, homogenizar la temperatura y la concentración. Todo esto con el fin de acelerar la ruptura de sólidos volátiles y producción de metano.

Experimentalmente se ha demostrado que la agitación adecuada en el reactor es esencial para cumplir con los siguientes objetivos:

- Poner en contacto el sustrato fresco con la población bacteriana y eliminar los metabolitos producidos por los microorganismos metanogénicos al favorecer la salida de los gases.
- Proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana.
- Prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.
- Prevenir la formación de espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del reactor y la formación de caminos preferenciales.
- Eliminar la estratificación térmica, manteniendo una temperatura uniforme en todo el reactor. [26]

La velocidad de agitación debe ser suficientemente fuerte para asegurar una correcta homogenización pero sin romper los agregados bacterianos. [4]

Tabla 2. Ventajas y desventajas del proceso anaerobio [4]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Tasa baja de síntesis celular y, por consiguiente, poca producción de lodos. • El lodo producido es razonablemente estable y puede secarse y disponerse para métodos convencionales. • No requiere oxígeno. Por tanto, usa poca energía eléctrica y es especialmente adaptable a aguas residuales de alta concentración orgánica 	<ul style="list-style-type: none"> • Para obtener grados de altos tratamiento requiere temperaturas altas. • El medio es corrosivo. • Tiene riesgo de salud por H₂S. • Exige un intervalo de pH bastante restringido.

- Produce metano, el cual puede ser útil como energético. El metano tiene un valor calorífico de aproximadamente 36.500kJ/m^3 .
- El biogás de los digestores contiene aproximadamente un 65% de metano y un valor calorífico de solo 22.400 kJ/m^3 , muy inferior al gas natural, mezcla de metano propano y butano, con un valor calorífico de 37.300 kJ/m^3 .
- Tiene requerimiento nutricionales bajos. [4]

- Requiere concentraciones altas de alcalinidad.
- Es sensible a la contaminación con oxígeno. Puede presentar olores desagradables por H_2S , ácidos grasos y amidas. [4]

1.10 TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN EL TRABAJO DE GRADO

1.10.1 Tratamiento aerobio: Ensayo Zahn Wellens ISO 9888

El ensayo de Zahn Wellens fue normalizado por la organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE) y estandarizado por la Organización Internacional de Normalización (ISO), por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) y por la Oficina Europea de Sustancias Químicas (ECB). Está clasificado por la OCDE como una prueba de biodegradabilidad intrínseca (desarrolladas en condiciones más favorables para la degradación, como el tiempo que dura el ensayo y el mantenimiento de la actividad adecuada del inóculo). La prueba Zanh Wellens se basa en el seguimiento de la pérdida de COD ó DQO, sin embargo, utiliza concentraciones altas de la sustancia de prueba que pueden ser tóxicas para los microorganismos. [76]

Con este método se pretende determinar la biodegradación y eliminación de compuestos orgánicos o constituyentes del agua residual solubles en agua por la acción de los microorganismos aerobios sobres estos. La mezcla de ensayo contiene un medio inorgánico, lodo activado como inóculo mixto y un compuesto orgánico de ensayo como única fuente de carbono y energía, aparte del lodo. La cantidad de compuesto añadida se selecciona de modo que la concentración de carbono orgánico disuelto inicial (COD) se encuentre en el rango comprendido entre 50 mg/L y 400 mg/L , o bien de modo que la demanda química de oxígeno (DQO) esté comprendida entre 100 mg/L y 1000 mg/L , dependiendo de su solubilidad en agua y de su toxicidad para las bacterias del inóculo. [76]

La medida de la concentración de COD (o de DQO) se realiza al principio y al final del ensayo (normalmente a los 28 días) y a intervalos regulares en el transcurso del ensayo, según sea preciso. Con el fin de permitir una adsorción significativa

del compuesto de ensayo sobre el lodo activado, se toman también muestras 3 horas después del inicio del ensayo. Los valores obtenidos en ese momento se toman como base de cálculo del porcentaje de biodegradabilidad final en cada momento de muestreo [23, 3].

1.10.2 Tratamiento Anaerobio: Ensayo Actividad Metanogénica Específica

La actividad metanogénica específica (AME) permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios. La AME además de ser usada para el monitoreo de la calidad del lodo en reactores anaerobios, es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y determina la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema, con el fin de examinar la degradabilidad de los sustratos y la posibilidad de selección de inóculos. [29]

Esta metodología aunque presenta aspectos favorables, también tiene límites debido a la complejidad de diversas etapas y poblaciones involucradas, siendo las bacterias metanogénicas las que poseen las más bajas velocidades de crecimiento, y a la poca disponibilidad de inóculos de buena calidad y cantidad suficiente. Esto ocasiona que los periodos de arranque de los reactores sean relativamente largos. [75]

Aunque se tenga un inóculo de buena calidad, los reactores deben iniciarse con cuidado para lograr una velocidad de crecimiento apropiada de las bacterias metanogénicas y que el reactor sea capaz de retener todo material celular generado. [75]

El tratamiento anaerobio de aguas residuales, por ser un proceso biológico, requiere de nutrientes esenciales para el óptimo desarrollo de las bacterias, la síntesis de sus constituyentes celulares y la degradación eficiente de la materia orgánica presente en el agua a tratar. Dependiendo de la cantidad requerida, los nutrientes pueden ser clasificados como macronutrientes (nitrógeno, fósforo, azufre) que son indispensables para el buen desempeño de los microorganismos anaerobios o micronutrientes (elementos traza: hierro, níquel, magnesio, cobalto, calcio, sodio, bario, molibdeno) , el hierro, el níquel y el cobalto se encuentran en las bacterias metanogénicas en concentraciones más altas que en otras bacterias y el más importante el hierro que sirve para la conversión del ácido acético a metano, y estos nutrientes son importantes para la función celular. Los nutrientes no son los culpables de todos los problemas operacionales del tratamiento

anaerobio, pero su presencia y disponibilidad pueden suponer a la corrección de la mayoría. [75]

Teniendo en cuenta la facilidad de implementar mediciones de AME por el método volumétrico, se enfatizará en este tipo de medición por su potencialidad de aplicación en nuestro medio. El método volumétrico se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, como el NaOH o el KOH, en un rango de 15-20 g/L, por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido. Se recomienda que el pH del NaOH sea superior a 12 unidades para garantizar que éste atrape el CO₂ producido. [29]

2. MARCO JURIDICO

Entre los diversos tipos de agresiones al Medio Ambiente, probablemente una de las que más ha centrado la atención del mundo investigador en los últimos años ha sido el vertido de efluentes líquidos procedentes de actividades urbanas, agropecuarias e industriales a los medios acuáticos naturales. Esto ha sido así porque no existe la conciencia de que el agua es un bien escaso, y el conocimiento de que de su correcta gestión depende en gran medida del funcionamiento de nuestra sociedad.

En Colombia estos vertimientos son controlados por el decreto 1594 de 1984, en el cual se establecen valores máximos para los residuos líquidos que van a ser vertidos a los cuerpos de agua. Los valores para algunos de estos residuos son: en el capítulo VI del vertimiento de los residuos líquidos en su artículo 72 de las normas de los vertimientos las siguientes: para pH de 5 a 9 unidades, material flotante ausente, sólidos suspendidos, domésticos o industriales en usuario existente una remoción $\geq 50\%$ en carga y para usuarios nuevo $\geq 80\%$ en carga y la demanda bioquímica de oxígeno para desechos domésticos en usuarios existentes de una remoción $\geq 30\%$ en carga y usuarios nuevos una remoción $\geq 80\%$ en carga, y desechos industriales en usuarios existentes de una remoción de $\geq 20\%$ y usuarios nuevos remoción $\geq 80\%$ en carga, la cual es modificada por el decreto 3930 del 2010 el cual rige a partir de la fecha de su publicación y deroga las disposiciones que le sean contrarias, en especial los artículos 193, 213 a 217 y 231 del Decreto 1594 de 1984, salvo los artículos 20 y 21 y esta es modificada por la ley 4728 de 2010 en la cual se derogan los artículos 28, 34, 35, 52, 54, 61 y 77 del numeral 21 del artículo 42 del decreto 3930 de 2010, en las cuales no se especifican los valores para los parámetros mencionados anteriormente. [30,31, 32]

3. MARCO GEOGRAFICO

3.1 Extensión y cobertura

La quebrada Manizales se encuentra localizada al sureste de la ciudad de Manizales. Nace al noroeste del nevado del Ruiz en el Alto del Colmillo a 3.520 msnm y desemboca en el río Chinchiná a los 1900 msnm cerca del Parque Bicentenario después de recorrer 11 kilómetros. [9]

La zona de su nacimiento posee vegetación de tipo natural, la cual en su recorrido cambia a ecosistema de paramo, viéndose afectada la Quebrada por el cultivo de papa, principalmente en la disminución de su caudal, seguido del aumento de nutrientes provenientes de abonos y sustancias tóxicas como insecticidas y matamalezas que son transportadas por las aguas de escorrentía de los campos agrícolas e incorporados al agua superficial. [9]

La alimentan dos grandes afluentes: quebrada la Elvira a 3400msnm al oeste de la quebrada; al sureste la quebrada farallones a 3550 msnm, que tienen influencia de las aguas provenientes de la explotación aurífera. [9]

En la parte media de la cuenca lleva sus aguas la quebrada la Selva al SE; las quebrada cristales al W; la quebrada cimitarra al oeste; y la quebrada Santa Rita al sureste. En la parte baja de la cuenca hay tributarios menores. [9]

La extensión de la cuenca de la quebrada Manizales es de 3.400 hectáreas, de las cuales 1.800 son rurales y 1.600 urbanas. Comprende el corregimiento de río blanco y la comuna tesorito que tiene una población aproximada de 22 mil habitantes (DANE 2005) en los estratos 2 a 6 en los barrios Monte Verde, Portal del Bosque, San Marcel, Colina del Viento, El pinar, Cerros de la Alhambra, Valles de la Alhambra, Arboretos, Maltería, La Enea, Lusitania, Bosques de la Enea, Verdum, Bajo Juanchito y La Alhambra. Las aguas negras de todos estos barrios son vertidas a la quebrada, además las aguas residuales de las industrias ubicadas en el sector de Juanchito: Progel, Industria Licorera de Caldas, Colombit, entre otras y zonas aledañas, y los vertimientos generados en las explotaciones mineras. [33]

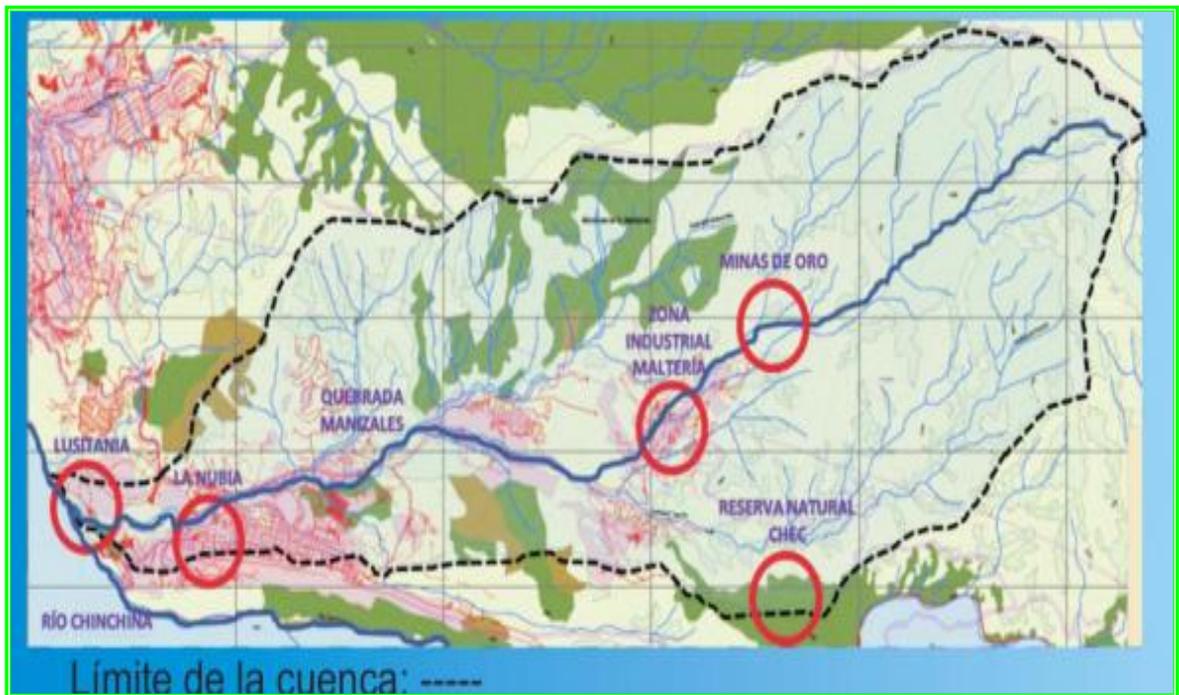


Figura 10. Microcuenca de la quebrada Manizales

Fuente: Plan de acción inmediato cuenca quebrada Manizales. 2012. p. 2,3. CORPOCALDAS [33]

3.2 Diagnóstico ambiental

La zona rural de la cuenca está localizada en la parte oriental aguas arriba de la quebrada y en zonas de alta pendiente. Por otro lado, se presentan problemas por deforestación, desprotección y fragmentación de ecosistemas, actividades agropecuarias y mineras con sistemas productivos insostenibles que entran en conflicto con la aptitud del suelo y la calidad del recurso hídrico. [34]

En la zona urbana, localizada en la parte baja de la cuenca, convergen actividades residenciales, industriales, comerciales y de servicios, resultando un conflicto de usos del suelo, dada la susceptibilidad de los mismos a deslizamientos y la contaminación ocasionada por la actividad industrial. [34]

La parte alta de la cuenca, con monocultivos y potreros para la ganadería en laderas de pendiente fuerte, sumado a la explotación aurífera que se da en este territorio, causan entre otros, situaciones de riesgo dentro de la cuenca, especialmente son responsables de contaminación de las aguas y continuos desprendimientos de tierra en las laderas, que a su vez colman la capacidad del cauce, lo llenan de sedimentos, que sumado a las precipitaciones intensas, reúnen los componentes perfectos para flujos densos de alto potencial energético, que

representan hoy, uno de los puntos de atención más importantes para la Corporación Autónoma Regional. [34]

4. METODOLOGÍA

Con la mezcla obtenida de las aguas de la quebrada Manizales, sector Maltería se realizaron dos montajes aerobio y anaerobio, con el objetivo de comparar cuál de los dos era el más eficiente para degradarla. En el desarrollo de este trabajo se realizaron 3 montajes durante un periodo de 6 meses utilizando diferentes lodos y con una mezcla que tenía diferentes vertimientos, para el tratamiento aerobio se utilizó el método Zahn Wellens y para el tratamiento anaerobio la actividad metanogénica específica (AME), adicionalmente se realizaron análisis fisicoquímicos al inicio y al final de cada ensayo.

4.1 Muestra de análisis

La muestra de agua se obtuvo de la mezcla de las aguas residuales industriales y domésticas que son vertidas de forma puntual por cada una de las fuentes generadoras hacia la quebrada Manizales, estas muestras fueron recogidas específicamente en el sector industrial Maltería. Las mezclas tomadas fueron mezcladas en una proporción equivalente al caudal originado por cada punto de vertimiento.

4.2 Muestreo

Durante todo el periodo de elaboración del proyecto se realizaron 5 muestreos en diferentes fechas que contenían las siguientes descargas de aguas residuales:

En la tabla 3 se muestra la actividad industrial de algunas de las empresas que realizan sus vertimientos en la quebrada, la contaminación debida al aporte de materia orgánica es generada mayormente por el sector industrial de alimentos. [9]

Tabla 3. Clasificación industrial internacional uniforme de las actividades económicas del sector industrial. [35]

EMPRESA	Código CIU	Clasificación industrial internacional uniforme de las actividades económicas del sector manufacturero-Revisión 3 adaptada para Colombia
Colombit S.A.	2395	Fabricación de artículos de hormigón, cemento y yeso
Descafeol S.A- FODEX S.A.	1063	Elaboración de derivados de café

Descafeinadora colombiana S.A.	1062	Descafeinado tostión y molienda de café
Industria licorera de caldas	1101	Destilación rectificación y mezcla de bebidas alcohólicas
Progel S.A.	1589	Elaboración de otro productos alimenticios ncp
Súper de alimentos S.A.	1082	Elaboración de cacao chocolates y productos de confitería
Toptec S.A.	2395	Fabricación de artículos de hormigón, cemento y yeso
Surtipiel	1090	Elaboración de alimentos preparados para animales

- 6 de Junio de 2012: esta mezcla contenía las aguas residuales de las industrias Progel S.A., Colombit Aguas Residuales Industriales (ARI), Colombit Aguas Residuales Domésticas (ARD), Surtipiel, Industria Licorera de Caldas Aguas Residuales Domésticas, Descafecol Solubles, Descafecol Descafeinado, TOPTEC, Súper de Alimentos Aguas Residuales Domésticas, Súper de Alimentos Aguas Residuales Industriales y las aguas industriales del puente Verdum y la Enea, menos los vertimientos de la Industria Licorera de Caldas Aguas Residuales Industriales.
- 12 de Junio de 2012: se presentaron todos los vertimientos del muestreo del 6 de junio, menos los vertimientos de la Industria Licorera de Caldas Aguas Residuales Industriales, Súper Aguas Residuales Industriales y Descafecol Descafeinado Aguas Residuales Industriales.
- 18 de Julio de 2012: se presentaron todos los vertimientos del muestreo del 6 de junio, menos los vertimientos de Descafecol Descafeinado
- 8 de Agosto de 2012: se presentaron todos los vertimientos del muestreo del 6 de junio, menos los vertimientos de Colombit Aguas Residuales Industriales ni Aguas Residuales Domésticas.
- 14 de Agosto: se presentaron todos los vertimientos del muestreo del 6 de junio, menos los vertimientos de Súper aguas Residuales Industriales ni Aguas Residuales Domésticas.

Las muestras se recogieron en frascos previamente lavados y purgados, fueron transportadas al laboratorio de procesos biológicos de la Universidad Tecnológica de Pereira en neveras con hielo para mantener la temperatura en 4°C.



Figura 11. Salida ARI Progel

Fuente: del autor



Figura 12. Quebrada Manizales

Fuente: del autor

4.3 Inoculo

Para cada montaje se requiere contar con inoculo que hace parte indispensable del reactor con el fin de tener contenidos en esté los microorganismos que van a realizar el trabajo de degradación de la materia orgánica. Por esto se realizó recolección de lodo para las condiciones aerobias y anaerobias.

Los lodos recolectados para cada fecha fueron:

Para la mezcla del día 6 y 12 de junio se utilizaron para el montaje dos tipos de lodo para el ensayo aerobio se utilizó lodo recolectado de la unidad de lodos activados del sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Yotoco en Cali y el lodo anaerobio se obtuvo de un reactor anaerobio UASB (reactores de flujo ascendente) de una consistencia granular del mismo sistema de tratamiento. Para la mezcla del día 18 de julio de 2012 se utilizaron tres tipos de lodo, para el ensayo aerobio se utilizó lodo de la unidad de lodos activados del sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Yotoco Cali y lodo recolectado de la unidad de lodos activados de la planta de tratamiento de agua de la Universidad Tecnológica de Pereira. Para el ensayo anaerobio se utilizó lodo recolectado de la unidad de lodos activados del sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Combia en Pereira, de una consistencia granular. Para las mezclas de los días 8 y 14 de agosto de 2012 se utilizaron tres tipos de lodo, para el ensayo aerobio se utilizó lodo de la unidad de lodos activados de la planta de tratamiento de agua de la Universidad Tecnológica de Pereira, y para el ensayo anaerobio se utilizaron dos tipos de lodo , lodo recolectado de un reactor anaerobio UASB de la

planta de tratamiento de la empresa Postobon en Pereira de una consistencia floculenta y lodo del relleno sanitario de Combia en Pereira de una consistencia granular.



Figura 13. Lodo anaerobio Postobon

Fuente: del autor



Figura 14. Lodo aerobio PTAR UTP

Fuente: del autor



Figura 15. Lodo anaerobio relleno sanitario Yotoco, Cali

Fuente: del autor

4.4 Ensayo aerobio: Zahn Wellens

Se utilizaron como reactores frascos de plástico color azul oscuro (según las condiciones ambientales sugeridas en la metodología, el ensayo se debe realizar en la oscuridad o con luz difusa) [28], con capacidad de 1900 ml, acorde con la metodología se utilizó el 90% de la capacidad del recipiente, por lo que la cantidad total a adicionar de mezcla de ensayo que contenía lodo, agua residual y nutriente a este, fue de 1710 ml. A cada reactor se le adicionaron 500 ml de solución medio de ensayo (nutrientes) que contiene: solución **a)** 0,85g de fosfato monobásico de

potasio anhidro, 2,17g de fosfato bibásico de potasio, 3,34g fosfato ácido de sodio dihidratado, 0,05g cloruro de amonio. Solución **b)** 2,25g de sulfato de magnesio heptahidratado. Solución **c)** 2,75g de cloruro de calcio anhidro. Solución **d)** 0,025g de cloruro férrico hexahidratado. De este modo el reactor quedó con una capacidad de 1210 ml que es repartida según la relación lodo-agua de 2:1.5, según ésta el 57,14% debe ser lodo y el 42,86 % debe ser el agua residual. El reactor debe tener una cantidad de sólidos suspendidos totales de 0,2 g/L a 1,0 g/L.

Para cada inóculo se preparó un reactor con el fin de verificar la actividad de éste, que contenía la misma cantidad de lodo, nutrientes y el compuesto a analizar fue reemplazado por un compuesto de referencia, el cual fue anilina vegetal con una concentración de 3000 mg/L.

Se preparó un reactor blanco que contenía la misma cantidad de inóculo que los reactores de ensayo y nutrientes.

Los ensayos se realizaron con aireación constante desde el momento en que se adicionaron todos los componentes hasta el momento de desmontarlos, sin agitación, a temperatura ambiente y no hubo ningún control sobre la cantidad de luz que llegaba a los reactores.

Según la metodología del ensayo Zahn Wellens la concentración de sólidos suspendidos totales en la mezcla final del reactor debe estar entre 0,2- 1,0 g de SST/L, por esto antes del inicio de cada montaje se determinó la concentración de sólidos para cada lodo. [28]. Durante el tiempo de desarrollo de la práctica se trabajó con 2 tipos de lodo con el fin de probar cuál de estos era más apropiado para tener un mayor porcentaje de degradación de la mezcla.

4.4.1 Primer montaje: Muestreo 6 y 12 de junio de 2012

4.4.1.1 Lodo relleno sanitario Yotoco, Cali (lodos activados)

El valor de los sólidos suspendidos para este inóculo fue de SST: 1,884g SST /L, se adicionaron 530 ml de lodo para que el reactor tuviera una carga de 0,58 g SST/L, 670 mL de solución medio de ensayo y 500 mL de la mezcla de agua residual.

El blanco para este lodo contenía 530 mL de inóculo, 670 mL de solución de medio de ensayo y 500 mL de agua. 4.4.2 Segundo montaje: muestreo 18 de julio de 2012

4.4.2.1 Inóculo relleno sanitario Yotoco, Cali (lodos activados)

El valor de los sólidos suspendidos totales para este inóculo fue de SST: 0,3867 g SST /L, se adicionaron 691 mL de lodo para que el reactor tuviera una carga de 0,267 g SST/L, 500 mL de solución medio de ensayo y 518 mL de la mezcla de agua residual.

El blanco para este lodo contenía 691 mL de inóculo y 1.019 mL de solución medio de ensayo; el reactor con el compuesto de referencia contenía 500 mL de nutrientes, 691 mL de inóculo y 518 mL de anilina vegetal.

4.4.2.2 Inóculo planta de tratamiento Universidad Tecnológica de Pereira (lodos activados)

El valor de los sólidos suspendidos totales para este inóculo fue de SST: 17,03 g SST /L, se adicionaron 60 mL de lodo para que el reactor tuviera una carga de 1, 038 g SST /L, 500 mL de solución medio de ensayo y 1150 mL de la mezcla de agua residual.

El blanco para este lodo contenía 60 mL de inóculo y 1.150 mL de solución medio de ensayo, el reactor con el compuesto de referencia contenía 500mL de nutrientes, 60 mL de inóculo y 1.150 mL de anilina vegetal.



Figura 16. Montaje Aerobio

Fuente: del autor

4.4.3 Tercer montaje: Muestreo 08 y 14 de agosto

4.4.3.1 Inóculo planta de tratamiento Universidad Tecnológica de Pereira (lodos activados)

El valor de los sólidos suspendidos totales para este inóculo fue de SST: 12,15 g SST /L, se adicionaron 82 mL de lodo para que el reactor tuviera una carga de

1 g SST /L; 500 mL de solución medio de ensayo y 1.128 mL de la mezcla de agua residual.

El blanco para este lodo contenía 82 mL de inóculo y 1.628 mL de solución medio de ensayo, el reactor con el compuesto de referencia contenía 500ml de nutrientes, 82 mL de inóculo y 1.128 mL de anilina vegetal. Cada reactor se monto con un duplicado con las mismas condiciones de trabajo.

4.5 Ensayo Anaerobio Actividad Metanogénica Especifica (AME)

Se utilizaron como reactores frascos de plástico color verde con capacidad de 3.800 mL, según la descripción de la metodología se utilizó el 90% de la capacidad del recipiente, por lo que la cantidad total a adicionar a éste tipo de reactor fue de 3.420 mL. Los reactores deben contener una solución de macronutrientes que contenía: 0, 47 g de cloruro de amonio, 0,01 g de Fosfato bibásico de potasio, 0,2 g de Bicarbonato de sodio, 3,7 g de Fosfato monobásico de potasio, 0,009 g de Sulfato de magnesio tetrahidratado, 0,008 g Cloruro de calcio dihidratado. Todos los reactivos se llevaron a un balón de 100 mL, y de éste se le adicionan al reactor 10 mL.

Solución de micronutrientes que contenía: 0,2 g de cloruro férrico hexahidratado, 0,005 g de cloruro de zinc, 0,003 g de cloruro de cobre dihidratado, 0,009 g de molibdato de amonio tetrahidratado, 0,005 g de cloruro de aluminio hexahidratado, 0,2 g de cloruro de cobalto hexahidratado, 0,005 g de cloruro de níquel hexahidratado, 0,005 g de ácido bórico, 0,01 g de selenito de sodio pentahidratado, 0,1g de EDTA, 1 mL de ácido clorhídrico, 0,05 g de rezazurin, 0,1 g de sulfito de sodio, 0,2 g de levadura. Todos los reactivos se llevaron a un balón de 100 mL, y de éste se le adicionan al reactor 10 mL.

La concentración inicial del lodo según la metodología del ensayo debe variar entre 1,0 y 1,5 g SVT/L o 2 g SVT/L, para calcular el volumen de lodo que se adicionó al reactor se utilizó la ecuación:

$$V_{lodo} = \frac{V_{mezcla} * Concentración\ fija}{Concentración\ inicial\ del\ lodo}$$

V lodo: Volumen de lodo a adicionar en el reactor

V mezcla: Volumen total de reacción o de mezcla

Concentración fija: concentración fijada (1,0- 1,5 g SVT/L)

Concentración inicial de lodo: Concentración de SVT inicial del lodo en (g/L)

Se cuantificó el volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, que para éste caso se utilizó hidróxido de sodio con una concentración de 15 g /L y un pH superior a 12.

Los montajes no tuvieron agitación constante, solo se agitaban diariamente antes de realizar la medición del hidróxido desplazado, no tuvieron control de temperatura, ni control de la luz a la que estaban expuestos.

4.5.1 Primer montaje: Muestreo 6 y 12 de junio de 2012

4.5.1.1 Lodo relleno sanitario de Yotoco, Cali (Reactor UASB)

Para realizar este primer montaje, se llevo a cabo el análisis de los sólidos suspendidos volátiles de los lodos a emplear como inóculo, encontrándose para éste primer lodo, tomado del reactor anaerobio del relleno sanitario de Yotoco un valor de sólidos suspendidos volátiles SSV de: 1,87 g SSV/L, de los cuales se adicionaron 1800 mL para que el reactor tuviera una carga de 1 g SSV/L, así mismo, se adicionaron 2 mL de micronutrientes y macronutrientes y 1600 mL de agua residual. Cada uno de estos reactores tenía duplicado, con la finalidad de tener datos más representativos y comparables entre sí. Para este inóculo se monto un blanco que contenía 1800 ml de lodo, 10 mL de solución de macronutrientes, 10 mL de solución de micronutrientes y 1600 mL de agua destilada.

4.5.2 Segundo montaje: Muestreo 18 de julio de 2012

4.5.2.1 Inóculo relleno sanitario Combia, Pereira

Se realizó el análisis de sólidos suspendidos volátiles para este lodo encontrándose un valor de SSV: 15,23 g SSV/L, de los cuales se adicionaron 337 mL de lodo para que el reactor tuviera una carga de 1,5 g de SSV /L, así mismo, se adicionaron 10 mL de macronutrientes y micronutrientes y 3,063 mL de la mezcla de agua residual. Cada uno de estos reactores tenía duplicado, con la finalidad de tener datos más representativos y comparables entre sí. Para este inóculo se monto un blanco que contenía 337mL de lodo, 10 mL de solución de macronutrientes, 10 mL de solución de micronutrientes y 3.063 mL de agua destilada.

4.5.3 Tercer montaje: Muestreo 08 y 14 de agosto

4.5.3.1 Inoculo planta de tratamiento de agua residual empresa Postobon S.A. Pereira (Reactor UASB)

Para realizar el tercer montaje, se llevo a cabo el análisis de los sólidos suspendidos volátiles de los lodos a emplear como inoculo, encontrándose para éste lodo un valor de sólidos suspendidos volátiles SSV de: 41,275 g SSV/L, de los cuales se adicionaron 124,3 mL de lodo para que el reactor tuviera una carga de 1,5 g SSV /L, así mismo, se adicionaron 10 mL de la solución de macronutrientes y micronutrientes y 3.276 mL de la mezcla de agua residual. Cada uno de estos reactores tenia duplicado con la finalidad de tener datos más representativos y comparables entre sí. Para este inoculo se monto un blanco que contenía 124,3 mL de lodo, 10 mL de solución de macronutrientes, 10 mL de solución de micronutrientes y 3.276 mL de agua.

4.5.3.2 Inóculo relleno sanitario Combia, Pereira

Se realizó el análisis de sólidos suspendidos volátiles para este lodo encontrándose un valor de SSV: 15,23 g SSV/L, de los cuales se adicionaron 337 mL de lodo para que el reactor tuviera una carga de 1,5 g de SSV /L, así mismo, se adicionaron 10 mL de macronutrientes y micronutrientes y 3,063 mL de la mezcla de agua residual. Cada uno de estos reactores tenia duplicado, con la finalidad de tener datos más representativos y comparables entre sí. Para este inoculo se monto un blanco que contenía 337mL de lodo, 10 mL de solución de macronutrientes, 10 mL de solución de micronutrientes y 3.063 mL de agua destilada.



Figura 17. Montaje Anaerobio

Fuente: del autor

4.6 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS ANALIZADOS

Estos parámetros se determinaron al inicio y al final de cada tratamiento, a las diferentes mezclas de aguas recolectadas

4.6.1 Demanda Química de Oxígeno

La determinación de la DQO se realizó con la metodología (5220 B) del estándar métodos. Se tomaron 2 mL de muestra de agua residual fueron llevados a un tubo para DQO, se le adicionaron 2 mL de solución digestora y 3 mL de solución catalizadora. Se prepararon dos blancos en los que se reemplaza la muestra por agua destilada. Se taparon los tubos y se homogenizaron utilizando el vortex, los tubos se llevaron a él digestor por dos horas a 150 °C, las dos horas se cuentan desde que se alcanza dicha temperatura. Uno de los blancos se digesto este es utilizado como blanco de tanda para hallar la DQO de las muestras, el otro blanco no es digestado con este se halla la concentración del titulante sulfato ferroso amoniacal (FAS). Se utilizaron dos digestores: Thermoreaktor TR 300 marca merk y Thermoreaktor velp scientifica eco 16. De cada muestra el análisis se realizó por duplicado.



Figura 18. Digestor DQO

Fuente: del autor



Figura 19. Montaje DQO

Fuente: del autor

4.6.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

La determinación de la DBO₅ se realizó con la metodología (5210B), método de electrodo de membrana, estándar métodos. Con el dato obtenido para cada muestra de la DQO se realizaron los cálculos para obtener el valor de la DBO teórica, con este valor se calculo el volumen de muestra que se debe adicionar a cada frasco Winkler. Cada botella tenía una capacidad de 300 ml, se llenaron aproximadamente 2/3 de su volumen con agua de dilución (que contenía inóculo y nutrientes) y se llevaron a la incubadora a 20 °C. Posteriormente se retiraron de

ésta y se le adicionó el volumen de muestra calculado, se realizó la medición de la DBO inicial, se completaron hasta el borde con agua de dilución y se taparon cuidadosamente evitando que hubiera presencia de burbujas. Se llevaron a la incubadora por 5 días y posteriormente al retirarlos de ésta se midió la DBO₅ final, con el oxímetro WTW Cell ox 325 OXI 3210 que tiene una temperatura de trabajo de 20 ± 3 °C corrección a la indicación de -1,4 °C. De cada muestra el análisis se realizó por duplicado.



Figura 20. Montaje DBO₅

Fuente: del autor

4.6.3 Sólidos suspendidos totales

La determinación de los sólidos suspendidos totales se realizó con la metodología, (2540D) estándar métodos. Para las muestras de los reactores aerobios se tomaron 50 mL y para los reactores anaerobios se tomaron 30 mL, se hicieron pasar por papel de microfibra de vidrio de 125 mm de diámetro marca Whatman en equipo de filtración al vacío, se utilizaron crisoles de vidrio. Se llevaron a la estufa por 2 horas a 150 °C, posteriormente se llevaron al desecador por aproximadamente 3 horas, finalmente se pesaron. De cada muestra el análisis se realizó por duplicado.



Figura 21. Filtración SST

Fuente: del autor



Figura 22. Crisoles SST

Fuente: del autor

4.6.4 Sólidos Suspendidos Volátiles

La determinación de los sólidos suspendidos volátiles se efectuó con la metodología (2540 C), estándar métodos. Se tomó la muestra final de los sólidos suspendidos totales y se llevó a la mufla a 525 °C por 20 minutos. Se pasaron los crisoles al desecador por aproximadamente 3 horas, posteriormente se pesaron. Este procedimiento se realizó 3 veces hasta obtener un peso con una variación menor al 4%. De cada muestra el análisis se realizó por duplicado.

4.6.5 Ácidos Grasos Volátiles

Se tomaron 50 mL de muestra de cada reactor se filtraron al vacío con papel filtro de 125 mm de diámetro marca Whatman las muestras se llevaron a pH 3 con HCl 0,1N. Posteriormente las muestras se llevaron a ebullición con reflujo, se titularon con NaOH 0,1 N hasta llevarla a pH 6.5. Para calcular la concentración de ácidos grasos volátiles se multiplicó el volumen consumido de la base por la concentración de ésta (meq/mL), dividiéndose por el volumen total de muestra que se analizó. De cada muestra el análisis se realizó por duplicado.



Figura 23. Montaje Ácido Grasos Volátiles

Fuente: del autor

4.6.6 Alcalinidad

La determinación de la alcalinidad se llevo a cabo con el método potenciométrico (2320), estándar métodos. Se tomaron 50 mL de muestra, la cual para los reactores aerobios se tituló con H₂SO₄ 0,02 N y los reactores anaerobios con H₂SO₄ 0,2 N y H₂SO₄ 1N dependiendo de la concentración de alcalinidad de la muestra. El procedimiento se realizó con agitación magnética lenta hasta pH 4.3. De cada muestra el análisis se realizo por duplicado.



Figura 24. Determinación Alcalinidad

Fuente: del autor

4.6.7 pH

La determinación del pH se realizó con la metodología (4500-H⁺), estándar métodos. Se tomo una cantidad generosa de la muestra con el fin de que el electrodo quedara completamente cubierto, bajo agitación constante, la medición se tomo con un pH metro AB15 marca Fisher scientific.



Figura 25. Medición pH

Fuente: del autor

4.6.8 Nitrógeno

La determinación de nitrógeno se realizó con la metodología (Kjeldahl total) (4500-N_{org} B), estándar métodos. Se tomaron 5 mL de muestra, se adicionó a ésta 10 ml de solución digestora y perlas de ebullición, se ensamblaron los tubos al digestor donde se programaron 3 rampas de calentamiento: rampa 1: 120 min a 120 °C, rampa 2: 120 min a 120 °C, rampa 3: 40 min a 375 °C. Se dejaron enfriar los tubos, se le adicionó a cada uno agua destilada y 3 mL de una mezcla de NaOH-Na₂SO₃, se llevaron al destilador por 6 min, donde el destilado se recogió en una

solución de ácido bórico al 2% y se titulo con H_2SO_4 0,02 N usando indicador mixto rojo de metilo-azul de metileno.



Figura 26. Digestor nitrógeno Kjeldahl

Fuente: del autor



Figura 27. Destilador nitrógeno

Fuente: del autor

Se utilizo para la determinación un digestor bloc digest μ 12 marca p selecta y un destilador PRO-NITRO II marca p selecta.

4.6.9 ANALISIS ESTADISTICO

Para el tratamiento de los datos se utilizo el paquete estadístico IBM SPSS statistics 20.0, realizando análisis de varianza de un factor (ANOVA) para establecer cuál de los dos tratamientos era más eficiente para tratar las aguas de la quebrada Manizales, sector Malteria. A partir del análisis estadístico descriptivo se analizara la confiabilidad de los datos obtenidos utilizando medidas de tendencia: media, varianza, y medidas de dispersión: desviación estándar y coeficiente de variación.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 MUESTRA DE ANALISIS

La muestra de agua se obtuvo a partir de la mezcla de los diferentes vertimientos que recibe la quebrada Manizales provenientes de las diferentes industrias ubicadas en el sector Maltería, durante el desarrollo del trabajo se realizaron cinco muestreos, en cada uno de ellos hubo presencia de diferentes vertimientos por esta razón la mezcla del agua a analizar no fue la misma.

5.2 ANALISIS CUANTITATIVO

5.2.1 Análisis estadístico para cada muestreo

- **Muestreos**

Con la mezcla obtenida previamente descrita en la metodología, se realizaron los montajes aerobio y anaerobio, de cada ensayo se montó un reactor con su respectivo duplicado. Para evaluar la biodegradabilidad se tomaron muestras dos veces por semana y se les determino a estas la DQO total.

Bajo las condiciones en las cuales se desarrolló este trabajo (sin calentamiento, sin agitación, temperatura ambiente aprox. 23-27° C, diferentes lodos y distintos tamaños de reactores por lo que la carga inicial de agua no fue igual en los montajes).

Los resultados del ensayo anaerobio obtenidos para los muestreos 1, 2 y 3 presentaron porcentajes de remoción negativos (Ver anexo 17) por lo que no se les realizaron análisis estadísticos descriptivos ni análisis estadístico ANOVA de un factor, estos porcentajes se pudieron dar por que el inoculo no se adapto al sustrato, porque al tomar la muestra para la medición de la DQO esta salía con partículas de lodo lo que aumentó el valor real de este parámetro obteniendo así resultados negativos para estos montajes.

Los resultados de los muestreos 1, 2 ,3 4 y 5 para el ensayo aerobio y los muestreos 4 y 5 para el ensayo anaerobio se muestran a continuación.

Para cada muestreo se montaron dos reactores que serán mencionados a lo largo del trabajo como: Tratamiento aerobio: muestreo 1 (reactor 1 y 2), muestreo 2 (reactor 3 y 4), muestreo 3 (reactor 1 y 2 LN lodo nuevo plata Universidad Tecnológica de Pereira y LV lodo viejo relleno sanitario Combia), muestreo 4 (reactor ocho uno y ocho dos que indican la fecha del muestreo), muestreo 5

(reactor catorce uno y catorce dos que indican la fecha del muestreo). Tratamiento anaerobio: muestreo 4 (reactor 8 uno y 8 dos LN lodo reactor UASB empresa Postobon, LV lodo reactor UASB empresa Postobon, LV lodo relleno sanitario Combia), muestreo 5 (reactor 14 uno y 14 dos LN lodo reactor UASB empresa Postobon, LV lodo relleno sanitario Combia)

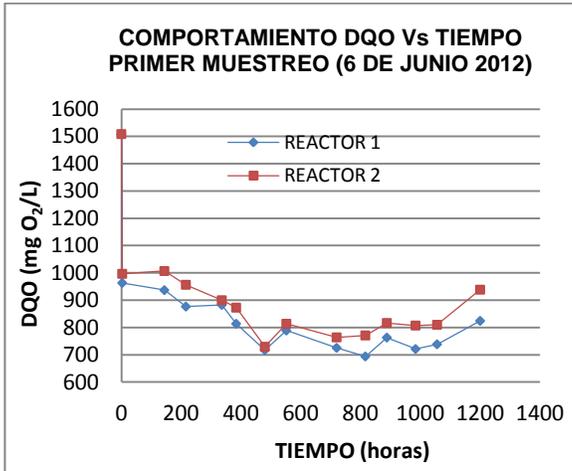


Figura 28. Gráfica DQO aerobia muestreo 1

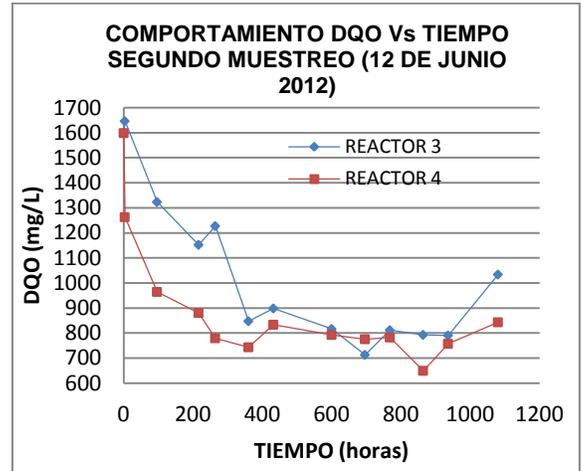


Figura 29. Gráfica DQO aerobia muestreo 2

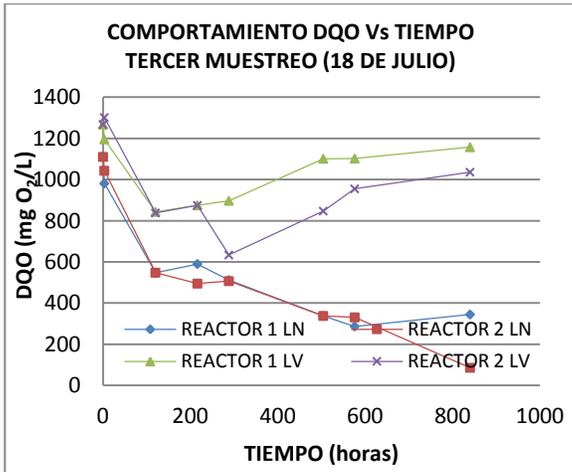


Figura 30. Gráfica DQO aerobia muestreo 3

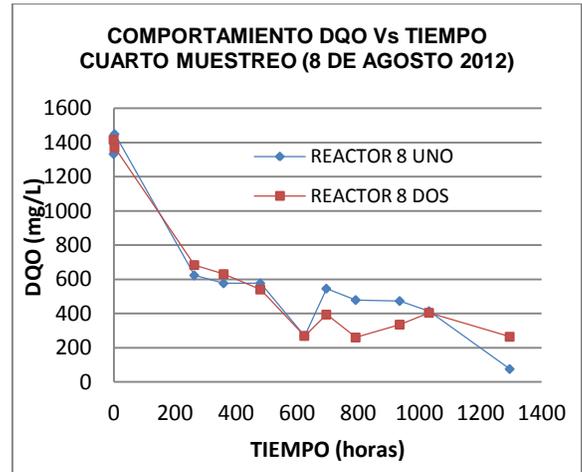


Figura 31. Gráfica DQO aerobia muestreo 4

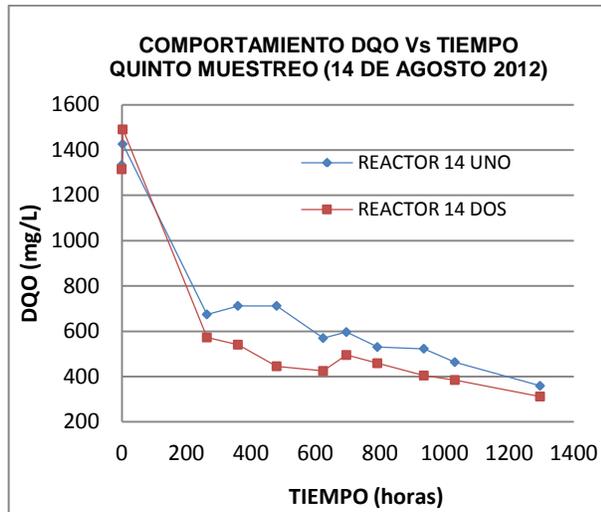


Figura 32. Gráfica DQO aerobia muestreo 5

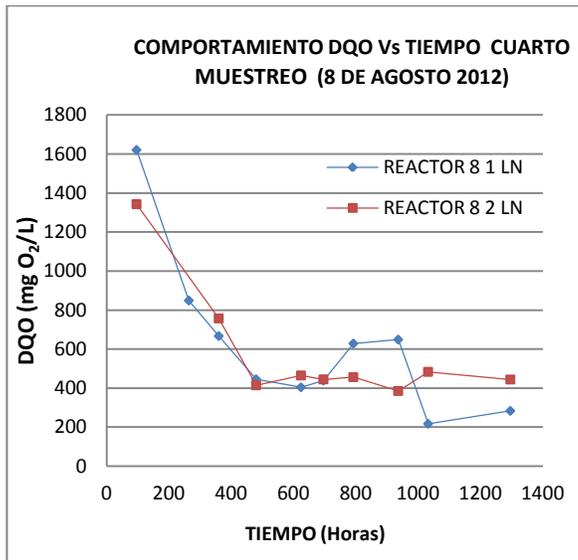


Figura 33. Gráfica DQO anaerobio muestreo 4 LN

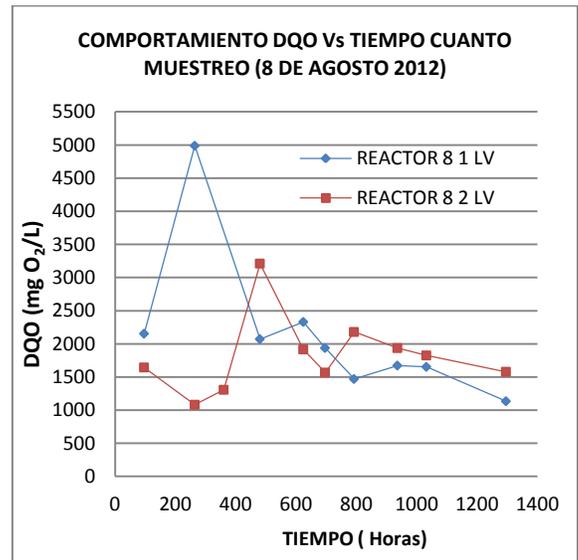


Figura 34. Gráfica DQO anaerobio muestreo 4 LV

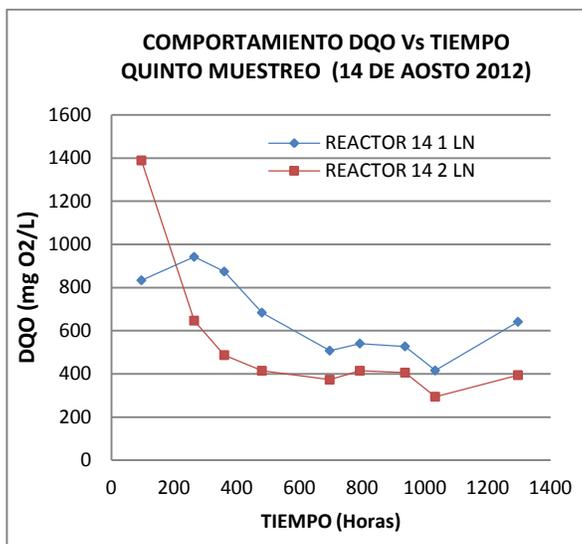


Figura 35. Gráfica DQO anaerobio muestreo 5 LN

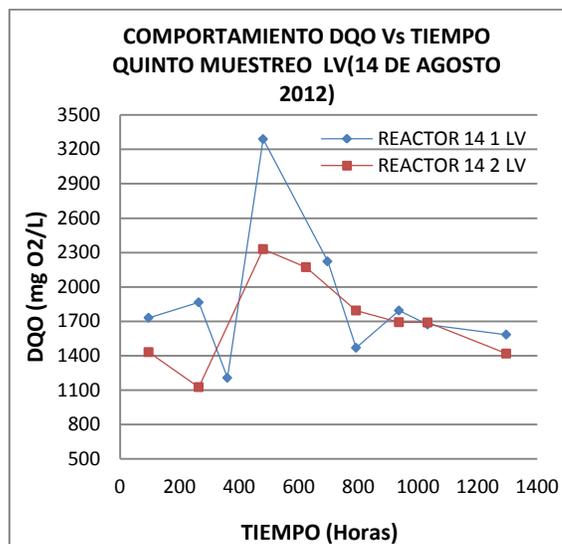


Figura36. Gráfica DQO anaerobio muestreo 5 LV

Tabla 4. TASA DE REMOCION EN mg/h TRATAMIENTO AEROBIO

TRATAMIENTO AEROBIO					
MUESTREO 1			MUESTREO 2		
TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)		TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)	
	REACTOR 1	REACTOR 2		REACTOR 3	REACTOR 4
0	0	0	0	0	0
3	91,57	86,02	3	-6,86	56,79
144	0,1	-0,022	96	1,7	1,62
216	0,35	0,346	216	0,67	0,381
336	-0,003	0,08	264	-0,12	0,176
384	0,084	0,036	360	0,47	0,048
480	0,091	0,134	432	-0,05	-0,088
552	-0,054	-0,064	600	0,06	0,033
720	0,04	0,032	696	0,07	0,013
816	0,019	-0,002	768	-0,05	-0,002
888	-0,032	-0,02	864	0,01	0,068
984	0,02	0,006	936	0	-0,048
1056	-0,006	0	1080	-0,09	0,032
1200	0,005	-0,005			

TRATAMIENTO AEROBIO					
MUESTREO 3					
TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)		TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)	
	REACTOR 1 LN	REACTOR 2 LN		REACTOR 1 LV	REACTOR 2 LV
0	0	0	0	0	0
3	50,1	26,38	3	13,23	-110,45
120	4,15	4,745	120	1,53	2,01
216	-0,22	0,286	216	-0,07	-0,08
288	0,31	-0,044	288	-0,03	0,43
504	0,98	1,284	504	0,3	0,64
576	0,1	0,015	576	0	-0,09
840	-0,06	0,337	840	0,04	0,02

TRATAMIENTO AEROBIO					
MUESTREO 4			MUESTREO 5		
TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)		TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)	
	REACTOR 1	REACTOR 2		REACTOR 1	REACTOR 2
0	0	0	0	0	0
3	-42,56	18,32	3	-33,87	-65,16
264	3,527	2,935	264	3,212	3,92
360	0,229	0,255	360	-0,015	-0,028
480	0,0024	0,206	480	0,003	0,369
624	0,528	0,466	624	0,246	0,037
696	-0,383	-0,162	696	0,0039	-0,071
792	0,086	0,173	792	0,086	0,048
936	0,0072	-0,122	936	0,0091	0,06
1032	0,059	-0,075	1032	0,059	0,02
1296	0,264	0,122	1296	0,082	0,057

Tabla 5. TASA DE REMOCION EN mg/h TRATAMIENTO ANAEROBIO

TRATAMIENTO ANAEROBIO			
MUESTREO 4			
TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)	TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)
	REACTOR 1 LN		REACTOR 2 LN
0	0	0	0
96	-4,89	96	-2,88
264	8,06	360	6,15
360	1,87	480	2,63
480	1,69	624	-0,29
624	0,27	696	0,14
696	-0,17	792	-0,05
792	-0,85	936	0,28
936	-0,07	1032	-0,34
1032	1,49	1296	0,11
1296	-0,18		

TRATAMIENTO ANAEROBIO			
MUESTREO 4			
TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)	TIEMPO (Horas)	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)
	REACTOR 1 LV		REACTOR 2 LV
0	0	0	0
96	-28,1	96	-8,73
264	-32,59	264	5,39
480	18,75	360	-1,87
624	-1,2	480	-11,69
696	2,05	624	6,22
792	1,86	696	1,61
936	-0,61	792	-2,24
1032	0,07	936	0,78
1296	1,16	1032	0,33
		1296	0,57

TRATAMIENTO ANAEROBIO					
MUESTREO 5					
	Tasa de remoción (mg O ₂ /h)				Tasa de remoción (mg O ₂ /h)
TIEMPO (Horas)	REACTOR 1 LN	REACTOR 2 LN	REACTOR 1 LV	TIEMPO (Horas)	REACTOR 2 LV
0	0	0	0	0	0
96	34,03	12,53	-0,58	96	8,97
264	-1,49	10,48	-1,48	264	3,57
360	0,82	1,71	5,73	480	-7,39
480	1,47	0,56	-12,91	624	0,79
624	1,04	0,25	7,58	696	-4,95
696	-0,13	-0,19	-2,04	792	5,91
792	0,07	0,05	2,8	936	0,34
936	0,43	0,43	-0,99	1032	0,02
1032	-0,77	-0,34	0,36	1296	0,62
1296	0,19	-0,29	0,21		

Con los resultados obtenidos en el análisis estadístico comparando la media y la mediana se observó que en todos los ensayos los datos de la tasa de remoción tienen un comportamiento asimétrico, ya sea con sesgo positivo o negativo (distribución con valores extremos altos y distribución con valores extremos bajos). [36, 37, 38]

Otro parámetro que permitió analizar los resultados obtenidos fue el coeficiente de variación, ya que relaciona la media con la desviación estándar. El coeficiente de variación permitió decidir cuál de los reactores tuvo un comportamiento con mayor dispersión en cada muestreo. [39] Se observó que en la mayoría de los reactores el coeficiente de variación de la tasa de remoción tuvo un comportamiento similar en cada pareja de reactores, generalmente menor al 5%, lo que indicó que los datos obtenidos tuvieron una distribución muy homogénea.

Por otro lado se observó que la pareja de reactores anaerobios del quinto muestreo (lodo relleno sanitario Combia) tuvo un comportamiento diferente con un coeficiente de variación de - 42,30 que es un resultado que está por fuera del rango aceptado para el análisis, lo que nos mostró que estos datos fueron muy

dispersos. Para el muestreo 3 aerobio (lodo relleno sanitario de Yotoco Cali) se observó un coeficiente de variación de - 24,86.

Para comparar los resultados de las tasas de remoción obtenidos y determinar cual método de ensayo (aerobio y anaerobio) fue más eficiente se realizó el análisis de varianza (ANOVA) de un factor. El análisis de la varianza (ANOVA) es una herramienta estadística, de gran utilidad tanto en la industria, en control de procesos, como en el laboratorio de análisis, en control de métodos analíticos [40]. Se utiliza para comprobar si hay diferencias estadísticamente significativas entre medias cuando se tienen más de dos muestras o grupos en el mismo planteamiento [41]. También se incluyeron las pruebas de Kolmogorov-Smirnov (normalidad de las poblaciones) que se utilizó para analizar los datos entre tratamientos, Levene (homogeneidad de varianza) y la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para establecer diferencias significativas entre las muestras.

Comparación entre medias

Para el análisis de las muestras se llevo a cabo una comparación múltiple de medias calculando estadísticamente la relación numérica entre las variables mediante el ANOVA de un factor, planteándose para esta prueba varias hipótesis.

- H_0 = No hay diferencias significativas entre los porcentajes de remoción en el tratamiento aerobio.
- H_1 = Si hay diferencias significativas entre los porcentajes de remoción en el tratamiento aerobio
- H_0 = No hay diferencias significativas entre los porcentajes de remoción en el tratamiento anaerobio.
- H_1 = Si hay diferencias significativas entre los porcentajes de remoción en el tratamiento anaerobio.

Las posibles fuentes de variación al momento de la cuantificación de la materia orgánica fueron: el error aleatorio en la medida de la concentración de la DQO, dada por la varianza en la medida y la segunda es la debida a las concentraciones de materia orgánica en las diferentes mezclas, dada por la varianza muestral.

Se realizaron los análisis de cada pareja de reactores tanto aerobios como anaerobios de cada muestreo, utilizando las pruebas de Shapiro Wilk y Levene. Para el ensayo aerobio en la prueba Shapiro Wilk los resultados obtenidos para cada pareja de reactores fueron menores al nivel de significancia (p-valor o valor

de p) de $\alpha = 0,05$ por lo tanto se concluye que los datos no se distribuyeron de forma normal, para la prueba de Levene los resultados fueron mayores al nivel de significancia (p-valor o valor de p) de $\alpha = 0,05$ por lo tanto se concluye que los datos si tuvieron homogeneidad en las varianzas. En el ensayo anaerobio en algunas parejas la prueba de normalidad como la de homogeneidad de varianzas dio un resultado menor al nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, como para ningún ensayo se cumplieron las condiciones para realizar ANOVA de un factor se les realizo la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis donde se obtuvieron valores de significancia mayores a $\alpha = 0,05$ los que nos permitió decidir que las parejas tenían un comportamiento similar.

Como los resultados obtenidos para cada tratamiento no presentaron diferencias significativas en la tasa de remoción, se tomó la decisión de asumir todos los reactores aerobios y anaerobios como un bloque de datos y realizar la comparación no entre tratamiento sino entre los datos totales obtenidos en cada ensayo.

La cantidad de datos que se analizó fue mayor de 50 por esta razón el análisis de los datos se realizó con el test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefos.

- **REACTORES AEROBIOS**

Tabla 6. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de normalidad				
	REACTOR	Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	Gl	Sig.
REMOCIÓN	REACTOR 1	0,528	13	0,000
	REACTOR 2	0,527	13	0,000
	REACTOR 3	0,460	12	0,000
	REACTOR 4	0,497	12	0,000
	REACTOR 5	0,395	9	0,000
	REACTOR 6	0,507	9	0,000
	REACTOR 7	0,435	9	0,000
	REACTOR 8	0,380	9	0,000
	REACTOR 9	0,500	10	0,000

REACTOR 10	0,419	10	0,000
REACTOR 11	0,509	10	0,000
REACTOR 12	0,541	10	0,000
a. Corrección de la significación de Lilliefors			

Tabla 7. Test de Levene para ensayo aerobio

Prueba de homogeneidad de varianzas			
REMOCIÓN			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,457	11	114	0,158

Se observó en la tabla 6 que el resultado obtenido para estos ensayos en la prueba de normalidad, dió un valor menor al nivel de significancia $\alpha = 0,05$, por lo se que se utilizó la prueba no parametrica de Kruskal-Wallis tabla 8 dando como resultado un valor de significancia mayor a $\alpha = 0,05$ aceptandose la hipotesis nula de que la distribucion del porcentaje de remocion es la misma entre los reactores, lo que indico que no hay diferencias entre los reactores aerobios, asumiendolos como un solo grupo.

Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para ensayo aerobio

RESUMEN DE PRUEBA DE HIPOTESIS			
HIPOTESIS NULA	TEST	Sig	DECISION
La distribucion de REMOCION es la misma entre las categorias de REACTOR	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	0,978	Retener la hipotesis nula.
Se muestran las significancias asintotics. El nivel de significancia es 0,05			

- **REACTORES ANAEROBIOS**

Tabla 9. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para ensayo anaerobio

Pruebas de normalidad	
REACTOR	Kolmogorov-Smirnov ^a

		Estadístico	gl	Sig.
REMOCIÓN	REACTOR 1	0,354	9	0,002
	REACTOR 2	0,210	10	0,200
	REACTOR 3	0,264	10	0,046
	REACTOR 4	0,210	9	0,200
	REACTOR 5	0,261	10	0,053
	REACTOR 6	0,335	9	0,004
	REACTOR 7	0,477	10	0,000
	REACTOR 8	0,367	10	0,000
a. Corrección de la significación de Lilliefors				

Tabla 10. Prueba de Levene ensayo anaerobio

Prueba de homogeneidad de varianzas			
REMOCION			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
3,117	7	69	0,006

Tabla 11. Prueba de Kruskal-Wallis para ensayo anaerobio

RESUMEN DE PRUEBA DE HIPOTESIS			
HIPOTESIS NULA	TEST	Sig	DECISION
La distribución de REMOCION es la misma entre las categorías de REACTOR	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	0,970	Retener la hipótesis nula.
Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es 0,05			

Como para este ensayo el número de datos es mayor a 50 se utilizó el test de Kolmogorov-Smirnov, obteniéndose como resultado un valor menor al nivel de significancia $\alpha = 0,05$ por lo tanto se concluye que los porcentajes de remoción no se distribuyen en forma normal, el test de Levene dio un valor de significancia menor de $\alpha = 0,05$ por lo tanto los datos no tienen homogeneidad de varianza, como estas condiciones no se cumplieron se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis obteniéndose un valor de significancia mayor a $\alpha = 0,05$ de 0,970 concluyéndose que no hay diferencias significativas entre reactores.

- **COMPARACIÓN ENTRE ENSAYO AEROBIO Y ANAEROBIO**

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó un análisis de homogeneidad de varianza y de normalidad para el grupo de datos de los ensayos aerobio y anaerobio, para determinar si existe una diferencia significativa en el porcentaje de remoción entre los tratamientos, planteándose las siguientes hipótesis.

- H_0 =No hay diferencias significativa en los porcentajes de remoción entre los tratamientos.
- H_1 = Si hay diferencias significativas en los porcentajes de remoción entre los tratamientos.

Tabla 12. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para ambos tratamientos

Pruebas de normalidad				
TRATAMIENTO		Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
REMOCIÓN	AEROBIO	0,418	126	0,000
	ANAEROBIO	0,249	77	0,000
a. Corrección de la significación de Lilliefors				

Tabla 13. Prueba de Levene para ambos tratamientos

Prueba de homogeneidad de varianzas			
REMOCIÓN			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0,800	1,000	201	0,372

Tabla 14. Prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para ambos tratamientos

RESUMEN DE PRUEBA DE HIPOTESIS			
HIPOTESIS NULA	TEST	Sig	DECISION
La distribución de REMOCION es la misma entre las categorías de TRATAMIENTOS	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	0,465	Retener la hipótesis nula.
Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es 0,05			

Los resultados obtenidos para las pruebas de homogeneidad de varianza y normalidad fueron menores al nivel de significancia $\alpha = 0,05$, se realizó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis obteniéndose como resultado un valor de significancia de $0,465 > 0,05$ por lo que se aceptó la hipótesis nula “no hay diferencias significativas entre los porcentajes de remoción en los tratamientos”.

- **CINETICA DE LOS TRATAMIENTOS**

La cinética describe las velocidades a las cuales las reacciones químicas y bioquímicas se desarrollan en diferentes condiciones. Existen 4 condiciones que influyen principalmente en la velocidad de reacción estas son: microorganismos (numero, tipo), cantidad de sustrato y biodisponibilidad (composición y tamaño de partícula entre otros), macronutrientes (nitrógeno, fosforo, potasio y azufre), micronutrientes (como magnesio y cobalto) y condiciones ambientales (humedad temperatura, oxígeno y pH). [68]

En la cinética de estos tratamientos se analizan dos procesos que tienen lugar en el sistema, que son la degradación de la materia orgánica y la reproducción de los microorganismos. La degradación de la materia orgánica es el propósito de la transformación biológica, en el caso de los microorganismos es muy importante la rapidez de su reproducción, ya que producen las enzimas que actúan, tanto de modo intra como extra celular para la conversión del sustrato. La velocidad de estas reacciones depende directamente de la acción de las enzimas y de la concentración del sustrato. [69]

Con los datos obtenidos de DQO se realizó el análisis de la cinética que tuvo lugar en la reacción de degradación de la muestra estudiada, mediante el método de regresión lineal el cual nos permitió determinar el orden de la reacción y su velocidad, para esta evaluación se analizó el comportamiento de las gráficas de la DQO tomándose los valores hasta donde estas se hicieron más estables ya que en este punto se pudo suponer que la reacción estudiada terminó, se observó igualmente que en las concentraciones finales de DQO hubo una tendencia a aumentar lo que pudo deberse al incremento de la población bacteriana por ende el sustrato empieza a disminuir, y la población tiende a un límite o saturación. A partir de este momento y en presencia de muy bajas concentraciones de alimento la población empieza a reducirse predominando los fenómenos de catabolismo o respiración endógena, donde los microorganismos metabolizan su propio protoplasma sin que este se regenere. Se puede producir lisis celular en la que la materia orgánica y nutrientes pueden ser alimento para los microorganismos que sobreviven, y puede ser susceptible a la oxidación. [70,71]

Experimentalmente se halló para cada muestreo la velocidad de reacción y su pseudorden, obteniéndose como resultado que para los muestreos 1, 2, 3 LV Y 5 aerobios un pseudorden de 2 y para los muestreos 3 LN Y 4 un pseudorden de 1. Para los muestreos 4 LV, 5 LN Y 5 LV anaerobios un pseudorden 2 y para el muestreo 4 LN un pseudorden de 1. En la literatura se han encontrado artículos referentes al orden de la reacción en los que experimentalmente obtuvieron cinéticas de pseudoprimer orden es decir la tasa de oxidación de la materia orgánica es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica biodegradable presente. Según los datos de pseudorden obtenidos en este trabajo y bajo las condiciones en las que se desarrollo no fue posible determinar con exactitud el orden de las reacciones estudiadas, los diferentes valores hallados se pudieron deber a que en ningún montaje se tuvo el mismo sustrato ni igual cantidad de inoculo y que ninguna de las variables que influyen en la velocidad de esta reacción fueron contraladas. [72, 73,74]

A continuación se muestran las gráficas del orden de la reacción y la tabla con las velocidades encontradas.

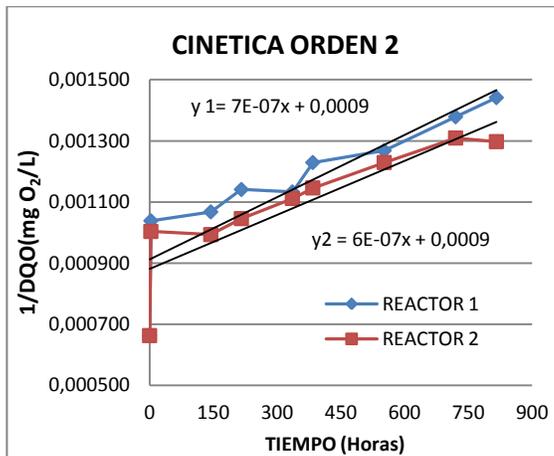


Figura 37. Gráfica cinética de la reacción muestreo 1 aerobio

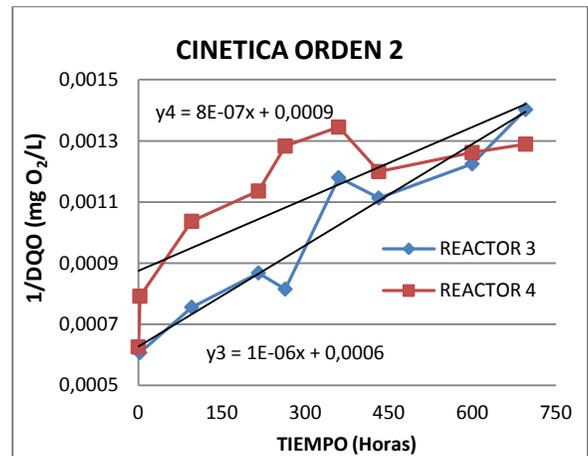


Figura 38. Gráfica cinética de la reacción muestreo 2 aerobio

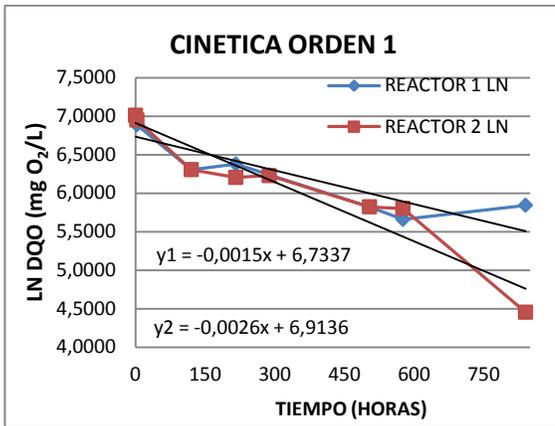


Figura 39 .Gráfica cinética de la reacción lodo nuevo muestreo 3 aerobio

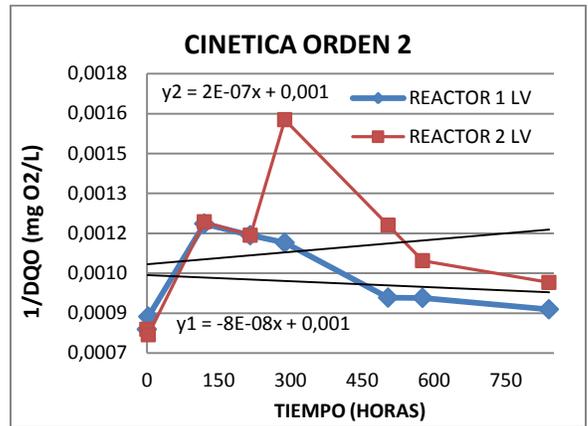


Figura 40. Gráfica cinética de la reacción lodo viejo muestreo 3 aerobio

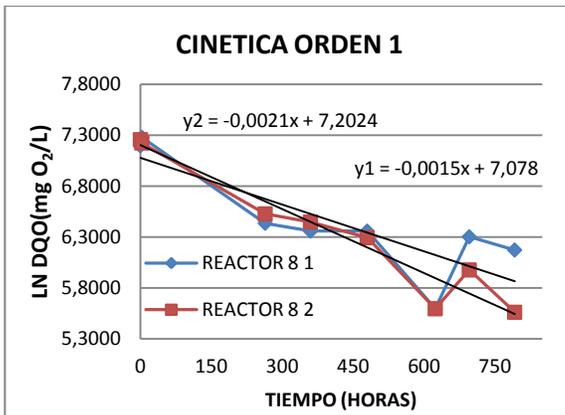


Figura 41. Gráfica cinética de la reacción muestreo 4 aerobio

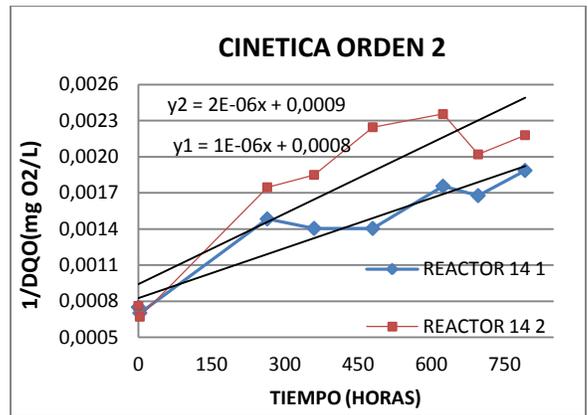


Figura 42. Gráfica cinética de la reacción muestreo 5 aerobio

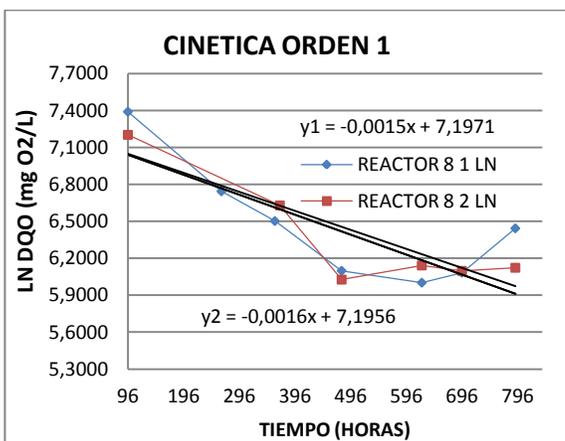


Figura 43. Gráfica cinética de la reacción muestreo 4 LN anaerobio

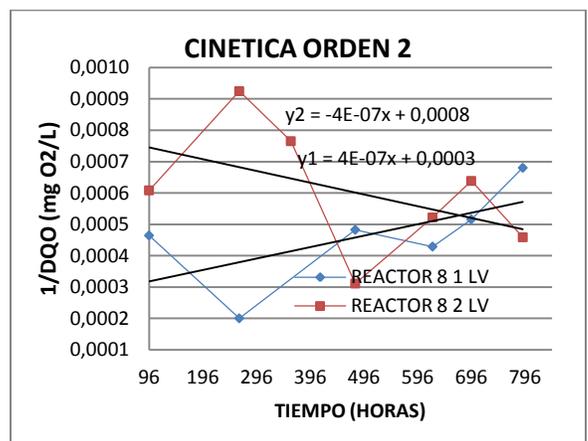


Figura 44. Gráfica cinética de la reacción muestreo 4 LV anaerobio

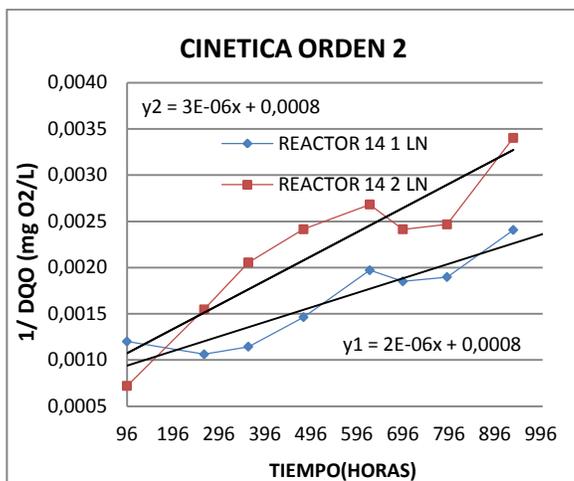


Figura 45. Gráfica cinética de la reacción muestreo 5 LN anaerobio

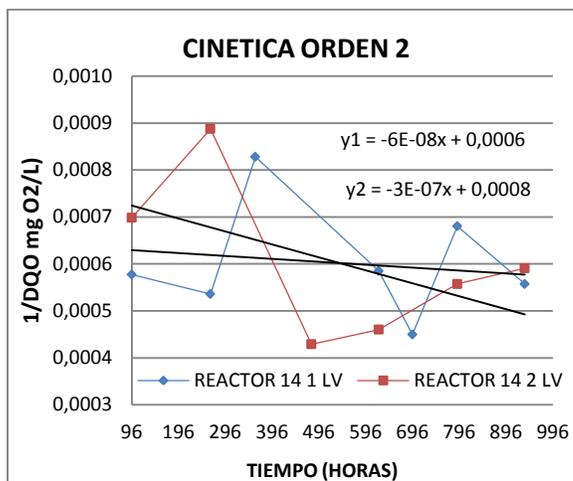


Figura 46. Gráfica cinética de la reacción muestreo 5 LV anaerobio

Tabla 15. Constantes de velocidad

TRATAMIENTO AEROBIO	
MUESTREO 1 (6 de junio 2012)	
	CONSTANTE DE VELOCIDAD K (mg O ₂ /L h)
REACTOR 1	7,00E-07
REACTOR 2	6,00E-09
MUESTREO 2 (12 de junio 2012)	
REACTOR 3	1,00E-06
REACTOR 4	8,00E-07
MUESTREO 3 (18 de julio 2012)	
REACTOR 1 LN	-0,0015
REACTOR 2 LN	-0,0026
REACTOR 1 LV	-8,00E-08
REACTOR 2 LV	2,00E-07
MESTREO 4 (8 de agosto 2012)	
REACTOR 1	-0,0015
REACTOR 2	-0,0021
MUESTREO 5 (14 de agosto 2012)	
REACTOR 1	1,00E-06

REACTOR 2	2,00E-06
TRATAMIENTO ANAEROBIO	
MUESTREO 4 (8 de agosto 2012)	
CONSTANTE DE VELOCIDAD K (mg O₂/L h)	
REACTOR 8 1 LN	-0,0015
REACTOR 8 2 LN	-0,0016
REACTOR 8 1 LV	-4,00E-07
REACTOR 8 2 LV	-4,00E-07
MUESTREO 5 (14 de agosto 2012)	
REACTOR 14 1 LN	2,00E-06
REACTOR 14 2 LN	3,00E-06
REACTOR 14 1 LV	-6,00E-08
REACTOR 14 2 LV	-3,00E-07

A continuación se muestran los porcentajes de remoción para cada tratamiento obtenidos en los diferentes muestreos.

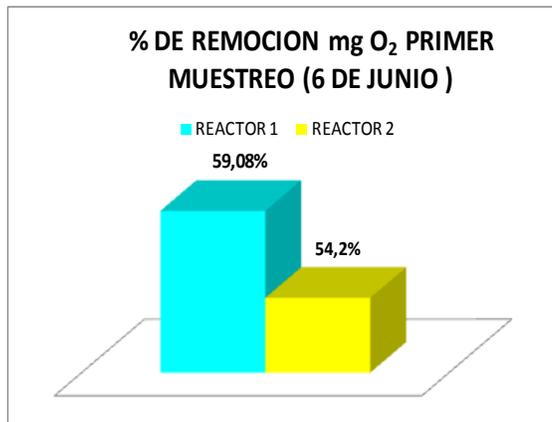


Figura 47. Gráfica porcentaje de remoción DQO primer muestreo ensayo aerobio

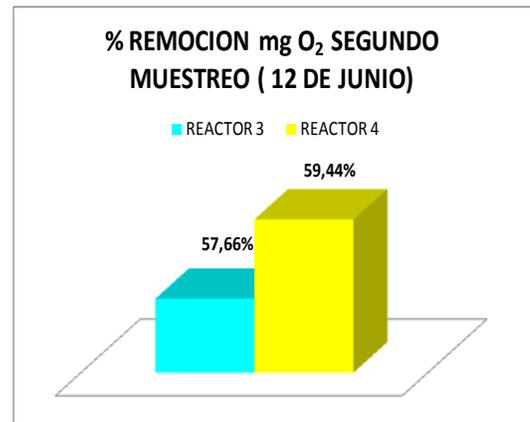


FIGURA 48. Gráfica porcentaje de remoción DQO segundo muestreo ensayo aerobio

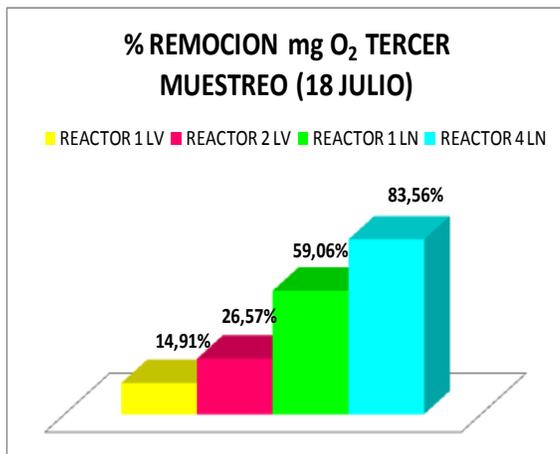


FIGURA 49. Gráfica porcentaje de remoción DQO tercer muestreo ensayo aerobio

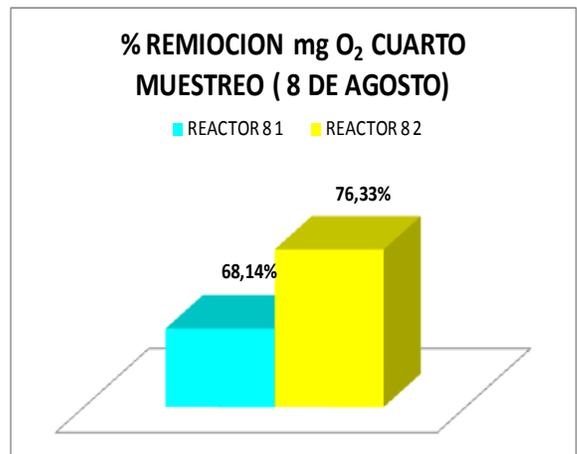


FIGURA 50. Gráfica porcentaje de remoción DQO cuarto muestreo ensayo aerobio

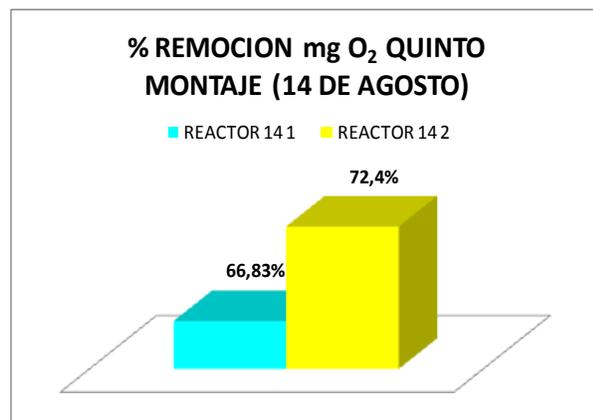


Figura 51. Gráfica porcentaje de remoción DQO quinto muestreo ensayo aerobio

En las graficas 47 a la 51 se pudo observar que los porcentajes de remoción no variaron de forma considerable dependiendo del lodo utilizado. En los muestreos tratados con el lodo de Yotoco, Cali (muestreos 1, 2 y los reactores 1 y 2 del muestreo 3) los porcentajes de remoción fueron inferiores a los reactores tratados con el lodo de la Planta de tratamiento Aguas Residuales UTP (reactores 3 y 4 LN del muestreo 3 y los muestreos 4 y 5), lo que indico que el lodo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales UTP fue más eficiente para la remoción de la materia orgánica en estas mezclas, que los microorganismos se adaptaron mejor al sustrato teniendo una remoción más eficiente o por que este lodo fue recolectado 2 meses antes que el lodo de la Planta de tratamiento Aguas Residuales UTP lo que pudo ocasionar baja presencia de población bacteriana para realizar el proceso de degradación.

En algunos estudios realizados anteriormente con el proceso de lodos activados para la degradación de aguas residuales se encontró que estos tuvieron resultados de porcentajes de biodegradación de 47% y entre el 73- 90%. En investigaciones realizadas anteriormente basadas en el tratamiento aerobio de Zahn Wellens se encontraron porcentajes de remoción para diferentes plaguicidas como el Laition y ultracid de 98% y 87% respectivamente, y para algunos herbicidas del 47% y 9% [42, 43, 44,45]

En las graficas (ver anexos 24 ,25 ,26 ,27 y 32) se mostro el comportamiento del pH con respecto al tiempo, se observo que los valores del pH fueron estables a lo largo del ensayo entre las parejas de reactores para cada muestreo, manteniéndose en un intervalo de 6 a 8 que no estuvo muy alejado del pH adecuado para este ensayo.

En las graficas 52 y 53 se pudo observar que los porcentajes de remoción variaron de forma considerable. Para el muestreo del 8 de agosto los valores obtenidos con el lodo de el relleno sanitario de Combia fueron inferiores a los resultados obtenidos con el lodo de la empresa Postobon, lo mismo sucedió con los resultados para el muestreo del día 14 de agosto, se obtuvieron porcentajes mayores con el lodo de la empresa Postobon , lo que podría indicar que la mezcla de este día era más fácil de tratar o que la población bacteriana se acoplo de una mejor forma al sustrato realizando una degradación más eficiente. Se observo que el comportamiento de los lodos provenientes de los rellenos sanitarios tuvo un porcentaje de remoción menor en los tratamientos esto se pudo deber a que tienen un alto grado de contaminación debido su elevada carga orgánica, concentración de productos tóxicos como metales pesados, compuestos organoclorados, sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos), alto contenidos de nitrógeno y fosforo y presencia abundante de patógenos. [58, 59, 60 ,61]

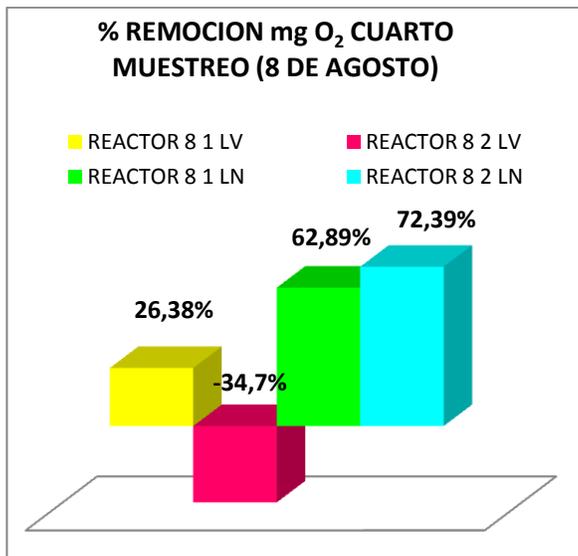


Figura 52. Gráfica porcentaje de remoción DQO cuarto muestreo ensayo anaerobio

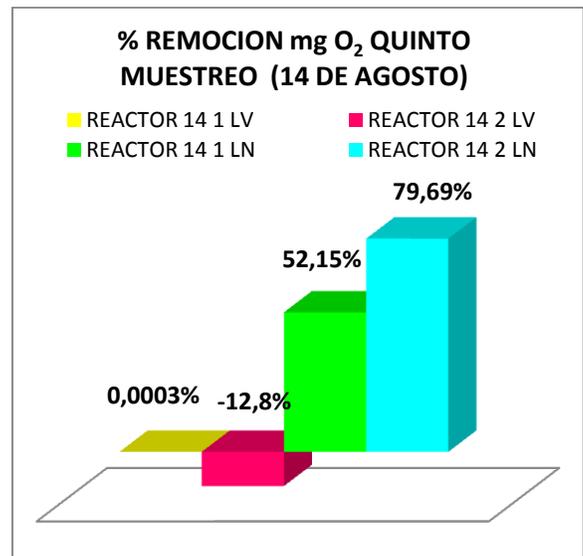


Figura 53. Gráfica porcentaje de remoción DQO quinto muestreo ensayo anaerobio

El agua de la quebrada Manizales sector Malteria puede tener los siguientes contaminantes generados por las diferentes industrias: metales como el zinc y el calcio que incluso a concentraciones mayores o iguales a 1 mg/l pueden inhibir el crecimiento de las bacterias. Los sulfatos pueden disminuir la actividad del proceso anaerobio porque se genera una competencia entre las bacterias sulfatoredutoras y metanogénicas por el alimento siendo las primeras las más beneficiadas en este proceso. Los taninos son compuestos tóxicos que son incorporados al agua en los vertimientos de las industrias productoras de café, pueden inhibir la actividad de las bacterias ya que causan un cambio en la fisiología de las células por su capacidad de formar complejos con moléculas (carbohidratos, proteínas, enzimas, membrana celular y polisacáridos), se han identificado tres mecanismos de toxicidad: inhibición enzimática y secuestro de sustrato, interacción con las membrana celulares y secuestro de iones metálicos, se ha encontrado que concentraciones de 600-800 mg DQO/l pueden inhibir el 50% del proceso anaerobio. Un alto contenido de carbonatos y sulfatos que generan aguas con una alcalinidad, pH, SST y SSD altos. [18, 62, 63]

En estudios realizados anteriormente para el tratamiento de aguas residuales industriales utilizando el método Actividad Metanogénica Especifica (AME) se encontraron porcentajes de remoción de 46%, 65%, 75% y entre 95-99%. [46, 47, 48, 49]

Paralelamente para este tratamiento se realizó la medición de la DQO soluble con el fin de observar la incidencia del lodo en el comportamiento de la DQO total, obteniendo resultados del 35-66% y 5-36% (ver anexos 34 y 35) para el lodo del relleno sanitario de Combia y 80-82% y 58-90% para el lodo de la empresa Postobon, con estas graficas se puede deducir que para este tipo de aguas residuales fue más eficiente el lodo UASB (up flow anaerobic sludge blanket o reactor anaerobio de flujo ascendente) de Postobon que el lodo del relleno sanitario de Combia.

- **ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECIFICA REACTORES ANAEROBIOS**

El ensayo de AME consiste en evaluar la capacidad de los microorganismos metanogénicos en convertir substrato orgánico en CH₄ y CO₂. De esta forma, a partir de cantidades conocidas de biomasa (sólido volátiles totales, SVT), bajo condiciones establecidas, se puede evaluar la producción de CH₄ a lo largo de un periodo de tiempo. Algunos métodos utilizados para la medición de la producción de CH₄ en el ensayo de AME son desplazamiento de líquido, cromatografía gaseosa y respirometría [50]. Por la facilidad del método la cuantificación del metano se llevo a cabo por el método volumétrico que consiste en el uso de una sustancia desplazante como NaOH o KOH con una concentración de 15-20 g/l y un pH mayor a 12 unidades, ya que esta solución tiene la propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás y así garantiza que se atrapa el CO₂ producido. [29]

Tabla 16. Resultados finales Actividad Metanogénica Especifica

MUESTREO 1 (6 DE JUNIO 2012)				
REACTORES	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN TEORICO (mL)	% SUSTRATO CONVERTIDO	AME
REACTOR 1	1632,8	1166	140,03	0,115
REACTOR 2	657,7	1166	56,41	0,012
MUESTREO 2 (12 DE JUNIO 2012)				
REACTOR 3	933,5	1179	79,18	1,936 E-3
REACTOR 4	294,8	1179	25	1,193 E-3
MUESTREO 3 (18 DE JULIO 2012)				
REACTOR I	2680,5	2035	131,72	0,045
REACTOR II	3079,2	2035	151,31	0,038
REACTOR III	3042,7	2035	149,52	0,039
REACTOR IV	3806,1	2035	187,03	0,073

MUESTREO 4 (8 DE AGOSTO 2012)				
REACTOR 8 1 LV	1267,9	1763	71,92	0,016
REACTOR 8 2 LV	357,73	1763	20,29	1,787 E-3
REACTOR 8 1 LN	1188,81	1885	63,07	0,013
REACTOR 8 2 LN	1226	1885	65,03	0,013
MUESTREO 5 (14 DE AGOSTO 2012)				
REACTOR 14 1 LV	912	2380	38,32	7,459 E-3
REACTOR 14 2 LV	1030,59	2380	43,3	0,019
REACTOR 14 1 LN	2393	2895	82,66	0,034
REACTOR 14 2 LN	1321,01	2895	45,63	8,779 E-3

En la tabla 16 se muestra el volumen total acumulado de biogás, generado en el tiempo de permanencia de los reactores, que se calculo por el volumen desplazado de NaOH al 12%, el volumen teórico de biogás, el porcentaje de sustrato convertido en metano a partir del volumen hallado experimentalmente y la Actividad Metanogénica Especifica. Los valores encontrados para esta fueron menores a 0,02-0,2 [57] (gDQO/gSTV*d) indicando que estos lodos tuvieron una AME baja, esto pudo deberse a que no se les realizo un acondicionamiento previo con el agua a tratar que podría facilitar la presencia de las diferentes bacterias que intervienen en el proceso y la adecuación de estas a las condiciones de trabajo. Sin embargo el volumen acumulado de hidróxido para los reactores estuvo entre 1000 y 3000 mL, lo que pudo deberse a que este no reacciono completamente con el CO₂ producido y no se pudo garantizar que todo el volumen sea desplazado por un biogás compuesto exclusivamente por metano.

En la figura 54 se muestra el aumento de la producción de biogás con respecto al tiempo para el muestreo 1, que pudo deberse a la adaptación y crecimiento de bacterias metanogénicas en la biomasa aumentando así la producción de biogás, ambos reactores alcanzaron el punto máximo de eficiencia entre los días 60 y 65 del ensayo. Esto se puede deber al agotamiento del sustrato y a la disminución de las bacterias metanogénicas. Observando que el reactor 1 tuvo una mayor producción de biogás y el reactor 2 tuvo un comportamiento asintótico más estable pero con menor producción de biogás.

En la figura 55 se muestra el comportamiento de la producción de biogás con respecto al tiempo del muestreo 2, en el que se observó que ambos tuvieron un comportamiento asintótico estable para la producción de este, alcanzando el punto máximo de eficiencia entre los días 50 y 60 del ensayo, el reactor 3 tuvo una mayor producción de biogás desde el inicio hasta el final del ensayo.

En la figura 56 se observó la producción de biogás con respecto al tiempo para el muestreo 3, para todos los reactores el punto máximo de eficiencia en la producción de biogás se alcanzó entre los días 20 y 30 del ensayo. Los reactores I y II con dilución tuvieron un comportamiento asintótico estable en cuanto a la producción de biogás, teniendo una mayor producción de biogás el reactor II. En los reactores III y IV con dilución se observó que el reactor IV tuvo una mayor producción de biogás pero un comportamiento menos estable en cuanto a la producción de este. Todos los reactores se inocularon con el mismo lodo (relleno Sanitario Combia) observándose que independientemente de la cantidad de materia orgánica suministrada a los reactores los microorganismos del lodo tienen la capacidad de asimilar la carga de la misma manera.

En la figura 57 se observó la producción de biogás con respecto al tiempo del muestreo 4. Los reactores 8 1 y 2 LN y 8 1 LV alcanzaron el punto máximo de eficiencia de la producción de biogás entre los días 25 y 35 del ensayo, teniendo una producción de biogás similar entre ellos aproximadamente 1200 ml, sin importar que el inoculo era diferente. El reactor 8 2 LV mostró poca producción de biogás y un comportamiento muy diferente a los demás reactores esto pudo tener varias causas: contaminación por oxígeno en el reactor o fugas en el montaje.

En la figura 58 se observó la producción de biogás con respecto al tiempo para el muestreo 5. Para los reactores 14 1 y 2 LN y 14 2 LV alcanzaron el punto máximo de eficiencia entre los días 25 y 35 del ensayo, teniendo una producción de biogás similar entre ellos de 900-1200 ml y un comportamiento asintótico estable en cuanto a la producción de biogás. El reactor 14 1 LV mostró un comportamiento muy diferente a los demás reactores, no presentó una producción asintótica de biogás, esto pudo deberse a la fuga de biogás o la contaminación del reactor por oxígeno.

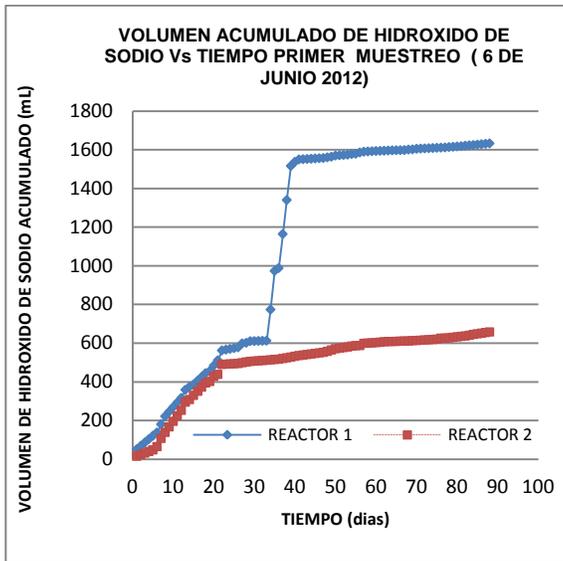


Figura 54. Gráfica Comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo primer muestreo reactores anaerobios

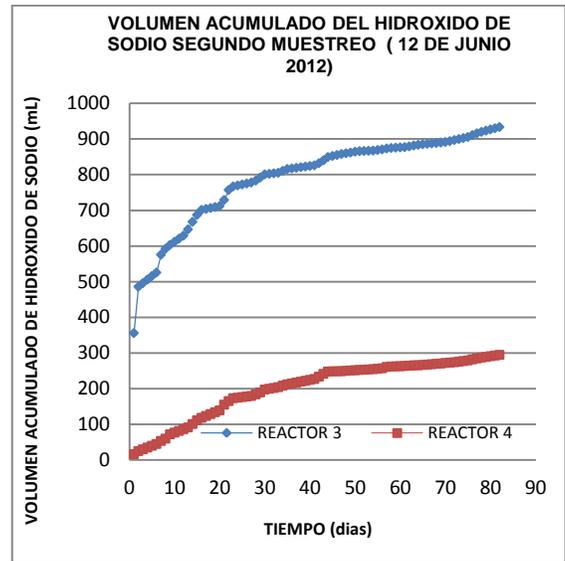


Figura 55. Gráfica Comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobios

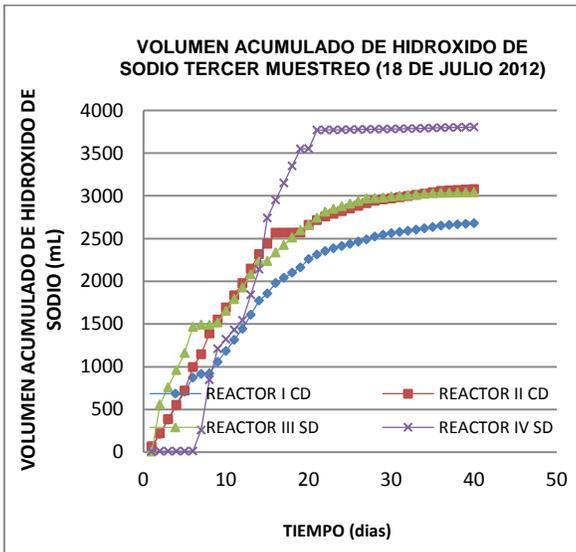


Figura 56. Gráfica comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución (CD) y sin dilución (SD)

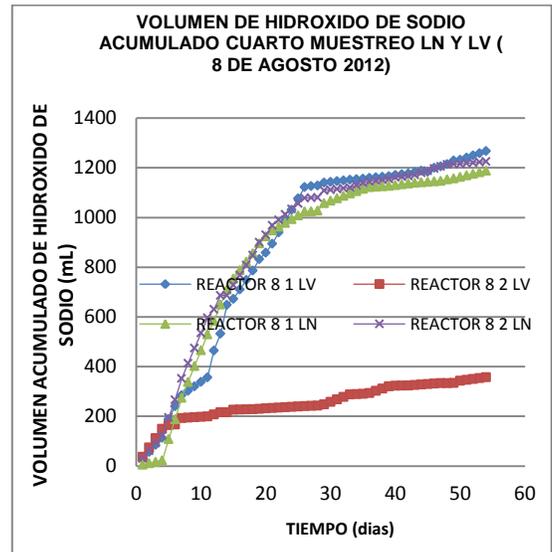


Figura 57. Gráfica comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN)

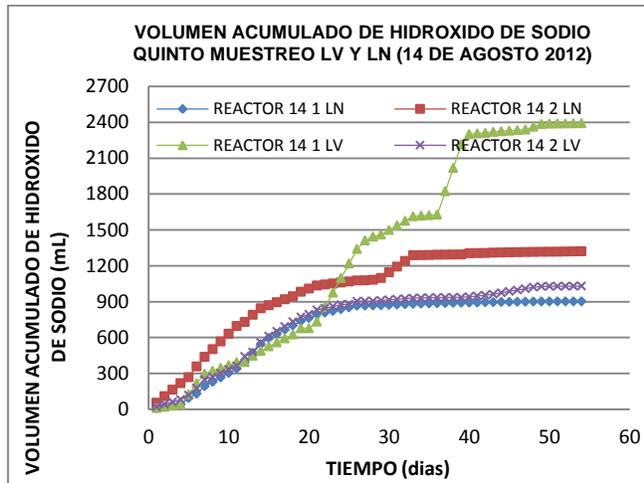


Figura 58. Gráfica Comportamiento del volumen acumulado de biogás Vs tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN)

En las gráficas (ver anexos 2, 3, 4, 5 y 6) se mostro el comportamiento del pH con respecto al tiempo, se observo que en algunos reactores el pH inicial tuvo valores bajos que no se volvieron a presentar a lo largo del ensayo, esto puede ser atribuido a la etapa acidogénica del proceso. En general los valores de pH entre las parejas de reactores en cada muestreo estuvieron en un rango de 6 a 8 unidades, cumpliéndose la condición indispensable para este tratamiento.

- **ANALISIS ESTADISTICOS DE PARAMETROS FISICOQUIMICOS**

Para los dos tratamientos en cada uno de los muestreos se realizo el análisis de los parámetros DBO₅, Sólidos Suspendidos Totales, alcalinidad y nitrógeno total Kjeldahl, al inicio y al final de cada montaje, los resultados obtenidos se muestran en las tablas 17 y 18.

- **TRATAMIENTO AEROBIO**

Tabla 17. Parámetros fisicoquímicos totales ensayo aerobio

AEROBIO					
MUESTREO 1 (06 DE JUNIO DE 2012)					
	DBO (mg O ₂)	SST (g SST/L)	SSV (g SSV/L)	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)	NITROGENO (mg N ₂)
INICIAL	860	315	31,5	315	0,53

FINAL	15,84	150	7,5	50	0,345
% REMOCIÓN	99,9	69,81	76,19	89,94	34,91
MUESTREO 2 (12 DE JUNIO DE 2012)					
INICIAL	445	276	27,6	326	15
FINAL	11,17	194	2,357	82	25,76
% REMOCIÓN	98,11	47,14	91,46	81,09	-2,19
MUESTREO 3 (18 DE JULIO DE 2012)					
INICIAL	818	370	37	270	40
FINAL LV	231	660	33	134	112
FINAL LN	61,6	272	13,6	37	28
% REMOCIÓN LV	75,47	-54,96	10,81	56,89	-143,24
% REMOCIÓN LN	92,91	30,83	63,24	87,11	34,13
MUESTREO 4 (8 DE AGOSTO DE 2012)					
INICIAL	890	294	29,4	331	63,5
FINAL	20,82	598,25	29,9	105	43,4
% REMOCIÓN	97,91	-80,94	NO	71,79	39,23
MUESTREO 5 (14 DE AGOSTO DE 2012)					
INICIAL	710	502	50,2	202	49
FINAL	13,71	396,5	19,83	88	28
% REMOCIÓN	98,28	29,77	60,5	61,27	49,19

Los resultados obtenidos para el tratamiento aerobio en cada muestreo mostraron una reducción para todos los parámetros medidos, con excepción del muestreo 3 para el reactor inoculado con el lodo relleno sanitario Yotoco, Cali en los parámetros sólidos suspendidos totales y nitrógeno total.

La disminución del nitrógeno total se debió al proceso de nitrificación que es la oxidación de nitrógeno a ion NH_4^+ por la acción de las bacterias nitrosomas, generando nitrito, que es oxidado por las bacterias nitrobacter a nitrato NO_3^- [51,52,53]

La disminución de la DBO_5 se debió a la reducción en la materia orgánica presente en el reactor por lo que el requerimiento de oxígeno de las bacterias se hizo menor al tener menos sustrato para degradar, también se observó una disminución en los sólidos suspendidos totales debido a este proceso. [54,55].

- **TRATAMIENTO ANAEROBIO**

Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos totales tratamiento anaerobio

MUESTREO 1 (06 DE JUNIO DE 2012)				
	DBO₅ (mg O₂)	SST (g SST/L)	ALCALINIDAD (mgCaCO₃/L)	NITROGENO (mg N/L)
INICIAL	1,29	315	315	53
FINAL	0,1037	2365	6514,5	488,6
% REMOCION	91,96	NO	NO	NO
MUESTREO 2 (12 DE JUNIO DE 2012)				
INICIAL	0,6675	276	326	15
FINAL	0.053	1891	6565	511,47
% REMOCION	92,06	NO	NO	NO
MUESTREO 3 (18 DE JULIO DE 2012)				
INICIAL	1,227	370	270	40
FINAL CD	0,722	12600	2121	294
FINAL SD	1,096	12680	3636	327,6
% REMOCION CD	41,16	NO	NO	NO
% REMOCION SD	10,68	NO	NO	NO
MUESTREO 4 (8 DE AGOSTO DE 2012)				
INICIAL	1,096	294	331	63,5
FINAL LV	0,0614	6055	6767	134,4
FINAL LN	0,0807	455	2575,5	93,8
% REMOCION LV	94,4	NO	NO	NO
% REMOCION LN	92,64	NO	NO	NO
MUESTREO 5 (14 DE AGOSTO DE 2012)				
INICIAL	1,065	502	202	49
FINAL LV	0,4178	3115	8837,5	148,4
FINAL LN	0,3059	908	3383,5	142,2
% REMOCION LV	60,77	NO	NO	NO
% REMOCION LN	71,28	NO	NO	NO

En los resultados obtenidos para la alcalinidad se observó que esta tuvo un aumento significativo en cuanto a la inicial, lo que fue favorable para el proceso

pues permitió que el pH no descendiera por debajo de 6 unidades, lo que ocasionaría que las bacterias metanogénicas se inhibieran, y logro mantener la estabilidad de los ácidos grasos volátiles evitando daños en el sistema. Mientras que la digestión anaerobia prosiga con normalidad, la alcalinidad oscilará entre 1000 y 5000 mg/L. Los ácidos grasos volátiles, disminuyen el pH a menos que la alcalinidad de bicarbonatos sea suficiente para neutralizar dichos ácidos. Es importante que haya suficiente alcalinidad en el sistema para obtener una buena eficiencia del proceso biológico. [54]

Mediante una reacción de descomposición anaerobia la materia orgánica sufre un proceso de desnitrificación, en la que se toma el oxígeno de los nitratos, se produce nitrógeno gaseoso que es eliminado, y un fango que sedimenta con alta producción de materia orgánica. [56]. En el proceso de desnitrificación teóricamente se debe llegar a una eliminación de nitrógeno, experimentalmente se observo que bajo las condiciones de este ensayo no hubo remoción de este, lo que pudo ser atribuido a que en el momento de tomar la muestra para hacer la medición esta estaba contaminada con lodo, cuantificando así además del nitrógeno del agua la del lodo. Por esta misma razón se observo en los resultados para el análisis de sólidos suspendidos totales el aumento en la medición final.

7. CONCLUSIONES

- Se realizó la construcción y la puesta en marcha de reactores aerobios y anaerobios para el tratamiento de aguas residuales a de escala laboratorio; los reactores aerobios cuentan con un volumen total de 1,9 L y los anaerobios con un volumen total de 3,8 L, el montaje se realizo en el laboratorio de procesos biológicos de la Facultad de Ciencias Ambientales en la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Se caracterizó la mezcla de aguas residuales de las industrias del sector Maltería, quebrada Manizales, realizando análisis de los siguientes parámetros: pH, alcalinidad total, DQO total, sólidos totales, sólidos volátiles (g/L), y nitrógeno total. Se concluyó que la mezcla de aguas residuales , se caracteriza principalmente por tener un pH entre 6 y 8 unidades, una concentración promedio alta de 1531 mg O₂/L de DQO total , una concentración promedio alta de DBO₅ de 745 mg/L , cantidades de sólidos totales de 351,2 mg/L, y un promedio de la concentración baja de Nitrógeno total de 44,1 mg /L y una promedio de alcalinidad baja de 289 mg CaCO₃/L .
- El pH y la temperatura de los reactores aerobios oscilaron entre 6 y 8 unidades, 23 y 27 °C, respectivamente. Para los reactores anaerobios oscilaron entre 6,5 y 8 unidades, 23 y 27°C, respectivamente. El comportamiento de estos dos parámetros a lo largo de la evaluación indica una buena condición para la formación y desarrollo de los microorganismos para ambos tratamientos bajo las condiciones de operación de este trabajo.
- Con los tratamientos biológicos aerobios y anaerobios se logro reducir el valor de la DQO Total, con un contenido de matería orgánica promedio de las mezclas en los cinco muestreos de 1531 mg O₂/l encontrando porcentajes de remoción para el ensayo aerobio de 56%, 59% y 21% con el lodo de relleno sanitario Yotoco, Cali, y 70%, 72% y 68% con el lodo la planta de tratamiento de la UTP. Para el ensayo anaerobio de 10% para el lodo del relleno sanitario de Combia y 70% para el lodo del reactor UASB de la empresa Postobon, bajo las condiciones de operación de este trabajo.
- Según los valores obtenidos para los parámetros medidos en los ensayos y el porcentaje de remoción de materia orgánica, se puede concluir que el

tratamiento aerobio por el ensayo de Zahn Wellens es adecuado para el tipo de agua residual empleada en este estudio, por lo se puede tener en cuenta para utilizarse en una planta de tratamiento a escala real bajo las condiciones en la que se desarrollo este trabajo. Con el tratamiento anaerobio se pueden tener las mismas consideraciones teniendo en cuenta el diseño del reactor, inóculo y el control de parámetros que afectan a este proceso.

- Al someterse los reactores anaerobios a la acción de diferentes inóculos, se puede concluir según los porcentajes de remoción que los lodos provenientes de los rellenos sanitarios no son eficientes para la degradación de estas mezclas de aguas residuales bajo las condiciones de operación de este trabajo.
- Se puede concluir al realizarse el tratamiento estadístico ANOVA de un factor y la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para los porcentajes de remoción de los tratamientos aerobio y anaerobio, bajo las condiciones de este trabajo, que no existen diferencias significativas, siendo cualquiera de los dos útiles para la remoción de la materia orgánica presente en las aguas residuales provenientes de las industrias del sector Maltería, quebrada Manizales.
- Con el ensayo anaerobio de la actividad metanogénica específica además de medir la DQO en el agua y controlar los parámetros de operación, pudimos observar que la actividad metanogénica específica de los inóculos utilizados en el ensayo fue baja. Los volúmenes recolectados de biogás fueron de entre 1000-3000 mL el cual puede ser aprovechado en otros procesos para la generación de energía.
- Para el análisis de las mezclas del último muestreo del ensayo anaerobio se midió la DQO soluble para determinar la incidencia del lodo en el resultado de la DQO total, los datos obtenidos en este análisis nos permiten concluir que hubo un mayor porcentaje de remoción en la DQO soluble y además nos permitió determinar que el lodo de la empresa Postobon fue más eficiente para la degradación de esta mezcla de aguas residuales.

8. RECOMENDACIONES

- Se sugiere para el ensayo aerobio seguir las recomendaciones de las condiciones ambientales del protocolo, en cuanto a la incidencia de la luz, que sea en un recinto cerrado y libre de gases y vapores tóxicos para los microorganismos, con el fin de obtener una eficiencia mayor en la remoción de la materia orgánica.
- Se sugiere para el ensayo anaerobio seguir las recomendaciones de las condiciones ambientales del protocolo, en cuanto a la agitación constante, mantener una temperatura entre 30-35 °C y un control riguroso de los parámetros fisicoquímicos y tóxicos que influyen negativamente en este ensayo.
- Se recomienda para el ensayo anaerobio realizar un diseño para el reactor más adecuado con el fin de evitar pérdidas del lodo al extraer la muestra, evitar fugas de biogás y entrada de oxígeno al reactor que pueden generar una lectura errónea de la DQO total.
- Se recomienda para el ensayo aerobio realizar la inoculación con lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, para el ensayo anaerobio se recomienda utilizar lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales. Para cualquiera de los tratamientos no es adecuado utilizar lodos provenientes de rellenos sanitarios (lixiviados).
- Se recomienda para los ensayos realizar una pre-exposición del lodo con la mezcla a tratar para que este se adapte a las características del agua y así generar unos porcentajes de remoción mayores.
- Se recomienda para próximos estudios relacionados con los residuos provenientes de la quebrada Manizales, sector Maltería que las mezclas a analizar contengan los mismos vertimientos con el fin de poder comparar de una manera más exacta los resultados obtenidos.
- Se recomienda realizar un estudio microbiológico del inóculo utilizado para el tratamiento anaerobio, ya que nos permitiría identificar los microorganismos que participan en el proceso de degradación.

- Se recomienda realizar el análisis de la DQO total por el método fotométrico con el fin de minimizar el gasto de reactivos y la cantidad de residuos líquidos generados durante el proceso.
- Se recomienda para la medición de la velocidad de reacción tener un control estricto de todos los factores que la afectan, si se desea tener un valor más representativo.

9. BIBLIOGRAFIA

1. Water for people wáter for life. Executive summary of the UN World, wáter development report. United Nations Educational, scientific and Cultural. Paris, 2003. UNESCO
2. FERNANDEZ Alba Rodríguez Antonio, Leton García Pedro, Rosal García Roberto, Dorado Valiño Miriam, Villar Fernández Susana, Sanz García Juana M. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Universidad del Alcalá, p.7-8.
3. CANDELA Rafael Vicente, Biodegradabilidad anaerobia evolución de la toxicidad y la biodegradabilidad de contaminantes persistentes en medios acuosos durante un proceso de fotocátalisis solar empleando diferentes técnicas analíticas. Tesis doctoral. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia: departamento de ingeniería textil y papelera Valencia.2007. p. 18.
4. ROMERO, Jairo Alberto. Caracterización de aguas residuales, Tratamiento de aguas residuales. 2 ed. Bogota: Escuela colombiana de ingeniería, 2002. p.17, 28-29, 37, 57-63, 70, 225-238.
5. MORENO Jaime, BUITRÓN Germán. Optimación de un biorreactor aerobio para el tratamiento de aguas residuales industriales. En: Computación y sistemas, edición especial. Febrero, 2002. p. 74-82.
6. VÁZQUEZ-Rodríguez Gabriela, Beltrán-Hernández Rosa Icela. Pruebas normalizadas para la evaluación de la biodegradabilidad de sustancias químicas. Octubre, 2004, Vol. 29 no. 10, .p.568-573.
7. RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento de aguas residuales. Traducido por: domingo jiménez beltran, federicode lora, rubens sette Ramalho. ed. .Editorial Reverté, 2003. P
8. BLANCO Cobian Daniel. Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost. Instituto de recursos naturales biodiversidad.Universidad de León. Area de Ingeniería Química,p. 9-16
9. BASTIDAS Tulcan Juan Carlos, Ramirez Ospina Luis Carlos. Determinación de la carga contaminante de origen industrial vertida sobre la quebrada Manizales.trabajo de grado especialista en ingeniería ambiental. Manizales: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.Facultad de Ingeniería Ambiental-area sanitaria, 2007 p. 12-15,20,21, XVII.
10. Correa Lina Paola, Chilatra Arcila Lizeth, Escobar Valencia Mario. Quebrada Manizales "basurero industrial". Universidad de Manizales. <https://sites.google.com/site/quebradamanizales1/>, consultada día: 18 abril de 2013.

11. El recurso agua. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de ciencias agropecuarias, red nacional de conservación de suelos y aguas. 2012.
12. TREVIZAN Rispoli Juan Francisco. Mirando sobre y bajo el agua. En: IDESIA. Agosto, 2011. vol 29 no. 2,. p. 169-174.
13. GONZALES Gonzales Maria Isabel, Chiroles Rubalcaba Sergio . Uso seguro y riesgo microbiológicos del agua residual para la agricultura. En: Revista cubana de salud pública. Mayo, 2010. vol 37 no.1. p. 61-73.
14. VALENCIA Alexander, Suarez Castaño Rodrigo, Sanchez Alejandra, Cardozo Elmer, Bonilla Marcela, Buitrago Cesar. Gestión de contaminación ambiental: cuestión de corresponsabilidad. En: Redalyc. Noviembre 2009 . no. 30. p. 90-99.
15. GOMEZ Marin Ana Maria, Naranjo Fernandez Dario, Martinez Andres Alfonso, Gallego Suarez Dario de Jesus. Calidad del agua en la parte alta de las cuencas Jaun Cojo y el salado (Girardota Antioquia). En: Revista facultad nacional de Agronomía. 2007. Vol 60 No.1. p. 3735-3749.
16. Campos Gómez Irene. Saneamiento ambiental, Costa Rica. Editorial universidad estatal a distancia, 2000. P. 58-64.
17. NADAL Angelica. Estudio del estado del proceso de depuración de la EDAR de cullera mediante técnicas de respirometría. Trabajo de grado Licenciatura de ciencias ambientales. Escuela politecnica superior de Gandia, Universidad politecnica de Valencia. Gandia, 2010. p. 8,9.
18. NEMEROW Nelson, Dasgupta Avijit. Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Madrid. Ediciones Diaz de Santos, S.A, 1998. p. 3-5, 15.
19. CERESO Castro Jose Antonio. Estacion depuradora de aguas residuales. Departamento de ingeniería química, Universidad politecnica de cataluña. Barcelona, 2011.p. 33.
20. MANAHAN Stanley. Introducción a la química ambiental. Mexico. Reverte ediciones S.A, 2007. Ed. 1. p. 214-215.
21. TORTORA, Funke, Case. Introducción a la microbiología. Buenos Aires. Editorial medica panamericana, 2007. Ed. 9. p. 835-836.
22. HENRY Glynn, Heinke Gary. Ingeniería ambiental. Mexico. Prentice Hall, 1999. Ed 2. p. 446.
23. MEJIA Sanchez Gaspar. Digestion anaerobia, folleto técnico. Universidad Autonoma de Yucatan, p. 5.
24. DEL REAL Olvera Jorge. Evaluación y modelo de la cinética de depuración anaerobia de vinazas de la industria alcoholera. Trabajo de grado doctorado en ciencias ambientales. Universidad Autonoma del estado de Hidalgo. Pachuca de Soto, Hidalgo, 2007. p. 10-29.
25. ORTIZ Jordá Verónica. Puesta a punto de una metodología para la determinación de la Actividad Metanogénica Específica (AME) de un fango anaerobio mediante el sistema oxitop. Influencia de las principales variables experimentales. Trabajo de grado Máster en ingeniería hidráulica y medio ambiente. Universidad politecnica de Valencia, 2011. p. 29-32.

26. Martí Ortega Nuria. Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process. Universidad Boca Raton Florida USA, 2006. p. 5-9.
27. LOPEZ Mendoza Claudia, Lopez Solis Omar. Construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la Universidad Veracruzana. Trabajo de grado de. Universidad de Veracruz, 2009. p. 22.
28. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Calidad del agua. Evaluación de la biodegradabilidad aerobia de los compuestos orgánicos en medio acuoso. Ensayo estático (método de Zahn-Wellens).NTC 4255.Colombia.p.4.
29. TORRES LOZADA Patricia, PÉREZ Andrea. Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. En: Ingeniería de recursos naturales y del ambiente. Enero-Diciembre, 2010. no.9. p. 5-14.
30. COLOMBIA, Ministerio Del Medio Ambiente. Decreto 1594. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la ley 9 de 1979, así como el capítulo II del Título VI -Parte III - Libro II y el Título III de la parte II I-Libro I - del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos., Cundinamarca, Editor. 26,junio,1984: Bogotá. p. 21,22.
31. COLOMBIA, Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo Terrotorial. Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la ley 9a de 1979, así como el capítulo II del título VI -partelll- libro II del decreto ley 2811 de 1974 en cuanto al uso de aguas y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. 25,OCTUBRE 2010: p. 1-26.
32. COLOMBIA, Ministerio De Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Decreto 4728*. Por el cual se modifica parcialmente el decreto 3930 de 2010. 23 de Diciembre de 2010: Bogotá. p. 1-3.
33. CORPOCALDAS, C.A.G., Plan de acción inmediato cuenca quebrada Manizales. 2012. p. 2,3.
34. GÓMEZ Mejía Sebastian. Quebrada Manizales, un escenario ambiental. Linea social espacio natural, Universidad nacional de Colombia, 2012: p. 1.
35. Resolucion No. 000139 por la cual la dirección de impuestos y aduanas Nacional – DIAN adopta la clasificación de actividades economicas – CIU revisión adaptada para Colombia. Noviembre 2011.
36. VILLEGAS Aleman Allan. Uso de las medidas de posición, curso de probabilidad y estdistica. Universidad Autonoma de Centroamerica, sede regional pacifico norte,2012. p . 2-4.
37. MORALES Vallejo Pedro. Medidas descriptivas de tendencia central y de dispersión. Universidad Pontificia de Madrid. En: estadistica aplicada a las ciencias sociales, 2008. p. 3-19.
38. TAPIA Moreno Francisco Javier. Interpretación de medidas estadísticas aplicada al area economico-administrativo. Universidad de Sonora, 2012.

39. LEVIN Richard, Rubin David. Estadística para administración y economía. Pearson educación de Mexico, S.A. Mexico 2004. Ed 7. p. 100-108.
40. BOQUE Richard, Maroto Alicia. El análisis de la varianza (ANOVA). Grupo de investigación quimiometría y cualimetría. Universitat Rovira i Virgili.
41. VALLEJO Morales Pedro. Introducción al análisis de varianza. Facultad de Ciencias Humanas y Sociales. Universidad Pontificia Comillas. Agosto 2012. p. 2, 3.
42. CANDELA Rafael Vicente. Evolución de la toxicidad y la biodegradabilidad de contaminantes persistentes en medios acuosos durante un proceso de fotocatalisis solar empleando diferentes técnicas analíticas. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Textil y papelera. 2007. p. 152-158.
43. OSORIO Ugarte Heydee. Tratamiento de aguas residuales domésticas por el proceso de lodos activados. Tesis de maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala. En: Panaidis. p. 6.
44. VARILA Quiroga Julian Andres, Díaz Lopez Fabio Eduardo. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. En: revista de tecnología Journal of Technology, 2008. Vol 7, no. 2. p. 25.
45. BARBA-HO Luz Edith, Becerra Dorancé. Biodegradabilidad y toxicidad de herbicidas utilizados en el cultivo de caña de azúcar. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales. 2011. p. 15-17.
46. FERNANDEZ Mikel, Abalos Arelis, Crombet Sandra, Caballero Eliana. Ensayo de biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales generadas en una planta refinadora de aceite de soja. En: Interciencia, 2010. Vol 35, no. 8. p. 603.
47. RODRÍGUEZ Pérez Suyén, Pérez Silva Rosa, Fernández Boizán Maikel. Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. En: Interciencia, 2000. Vol 25, no. 008. p. 388-390.
48. OSPINA C, Collazos C J. Biodegradabilidad anaerobia del efluente del proceso de curtido al tanino. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. p. 5-6.
49. FANG Hsieh Chia. Toxicidad metanogenica de purin de cerdo mediante ensayos discontinuos. Departamento de minas. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Chile. 2009. p. 57.
50. ANZOLA Melida del Pilar, Rojas Antonio, Oliveira Netto, Zaiat Marcelo. Actividad Metanogenica Especifica en un reactor anaerobio-aerobio aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas. En: interciencia, vol. 33, no.4. p. 284.
51. PEREZ Maria Luisa, Dautant Rafael, Contreras Antonia, Gonzalez Hubert. Remoción de fosforo y nitrogeno en aguas residuales utilizando un reactor discontinuo secuencial (SBR). XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México. Octubre, 2002.

- 52 Tratamientos de aguas residuales. IV revisión bibliográfica. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meiq/arenas_l_jr/capitulo4.pdf [online].
- 53 CARRERA Muyo Julián. Eliminación biológica de nitrógeno en un efluente con alta carga estudio de los parámetros del proceso y diseño de una depuradora industrial. Universidad Autonoma de Barcelona. Departamento de ingeniería Química Escuela Técnica Superior de Ingeniería. p. 56.
- 54 BERROCAL Karla Valerín. Evaluación fisicoquímica y microbiológica del sistema de tratamiento de aguas residuales en la planta santa maria del beneficio F.J Orlich ubicado en Orosi. Trabajo de grado de ingeniería en biotecnología. Escuela de biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.2002. p. 41-43, 90.
- 55 TORRESCANO España José Luis. Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados. En: aquaforum, no. 52. p. 15-16.
- 56 SILES Fernandez Esther, Monforte Garrido Jose, Estrany Coda Francesc, Oliver Pujol Ramon, Carreras Sergi. Eliminación de nitrógeno amoniacal en aguas residuales sanitarias. En: Tecnica Industrial, no. 273. 2008. p. 46.
- 57 LÓPEZ Torres Matilde, Villa Gómez Pilar, Escobedo Rigoberto. El comportamiento de reactores anaerobios de residuos sólidos a través de ensayos microbiológicos. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Departamento de Estudios sobre Contaminación Ambiental, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Cuba. En: Revista CENIC Ciencias Biológicas. Vol 35, no. 3. 2004. p. 181.
- 58 Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. Eugenio Giraldo. Universidad de los Andes.p. 44. <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rv14-A8.pdf>.
- 59 NOEGGERATH Franco Ingrid Melissa, Salinas Castillo Mayra Alejandra. Análisis comparativo de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. Trabajo de grado de ingeniería ambiental. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana, Poza Rica de Hidalgo. 2011. p. 4.
- 60 CORENA Luna Mironel de Jesús. Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios. Trabajo de grado de ingeniería civil. Facultad de ingeniería. Universidad de Sucre, Sincelejo. 2008. p. 19.
- 61 RIVERA Ocampo Nora Ximena, Valencia Ángel Norma Constanza. Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor de lodos activados. Facultad de ingeniería y arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. 2003. p. 1.
- 62 ESCÁRCEGA Cruz Sonia. Biodegradación de taninos de curtidurías mediante cultivos de *Aspergillus niger*. Tesis de maestría en biotecnología. División De Ciencias Biológicas y De La Salud, Departamento de Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Iztapalapa. 2001. p. 7, 10-11.

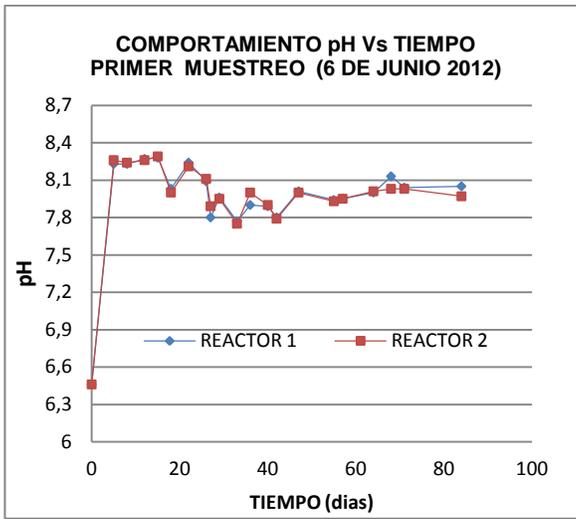
- 63 Alternativa para el tratamiento del residual de la destilería paraíso. <http://www.monografias.com/trabajos15/tratamiento-destileria/tratamiento-destileria.shtml>
- 64 Antecedentes del tratamiento de aguas residuales. Características de las aguas residuales. p. 2-3. http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca_virtual/doc003/CAPITULO2.pdf.
- 65 Sistema de Aguas Residuales para el Sector Café. Centro de Producción más Limpia de Nicaragua. Nicaragua. 2010. <http://www.aguasanitarias.com/aguas-cafe.html>
- 66 Elaboración de gelatinas. <http://www.cueronet.com/tecnica/gelatinas.htm>
- 67 Caracterización de corrientes residuales. p. 12. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2716/3/36244-3.pdf>
- 68 DEMERGASSO Semenzato Cecilia, Galleguillos Pérez Pedro, Escudero Gonzalez Lorena, Lam esquenazi Elizabeth. Estudio de la cinética de bioconversión de aguas residuales en la producción de agua potable. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associacao Brasileira de Engenharia Sanitaria e Ambiental. Porto Alegre, 2000. p. 2.
- 69 MEJIA Sánchez Gaspar. Digestión anaerobia. Mexico. Universidad Autónoma de Yucatán. p. 14 -15.
- 70 TEJERO J, Suárez A, Jácome J. Tratamientos Biológicos Fundamentos. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. p. 4, 7. ftp://ceres.udc.es/ITS_Caminos/Optativas/Ingenieria_Saneamiento_Urbano/pendientes-isa/TEMA30-rev201098-ajb.doc.pdf
- 71 Tecnología Ambiental. Grupo Tar. Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla. Procesos Biológicos Aerobios. p.5-6-7. http://alojamientos.us.es/grupotar/tar/formatec/tagua/t12_procesos_biologicos_aerobios.pdf
- 72 Caracterización de Aguas Residuales por DBO y DQO. Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales. p. 2-3. www.geocities.ws/edrochac/residuales/dboydqo2.pdf
- 73 LOPEZ López Alberto, De la Barrera Fraire Jorge, Vallejo Rodríguez Ramiro, Barahona Argueta Carlos. Estudio Comparativo Entre un Proceso Físicoquímico y un Biológico Para Tratar Agua Residual de Rastro. En: INTERCIENCIA. Julio, 2008. Vol 33 no. 7.
- 74 SARACHO M, Romero K, Flores M, Rodríguez C. Coeficiente cinético para diseño de unidades de tratamiento biológico de efluentes cloacales. Grupo de Energías Renovables Catamarca. Universidad Nacional de Catamarca. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. 2011. Vol 15. p. 1.
- 75 TORRES Patricia, Cardoso Antonio, Rojas Olga. Mejoramiento de la Calidad de Lodos Anaerobios. Influencia de la Adición de Cloruro Férrico. En: Ingeniería y competitividad. Vol 5 no. 2. Mayo 2004.p. 24-25-26.

76 VAZQUEZ Rodríguez Gabriela, Beltrán Hernández Rosa Icela. Pruebas Normalizadas para la Evaluación de la Biodegradabilidad de Sustancias Químicas. Una revisión. En: INTERCIENCIA. Vol 29 no. 10 octubre 2004. Caracas. p. 1-2,8.

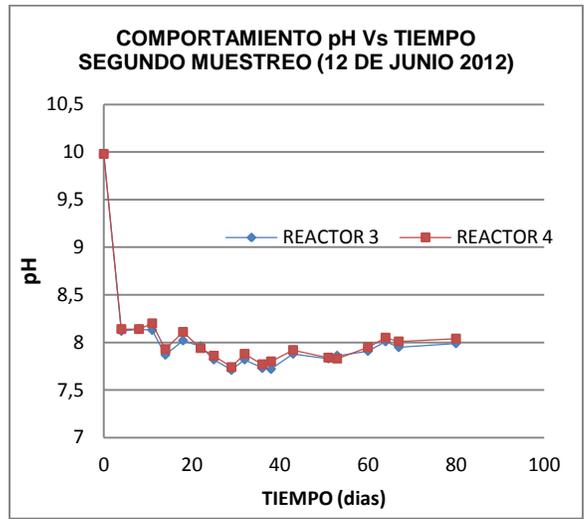
10. ANEXOS

ANEXO 1. Tabla comportamiento de pH Vs tiempo primer muestreo reactores anaerobios

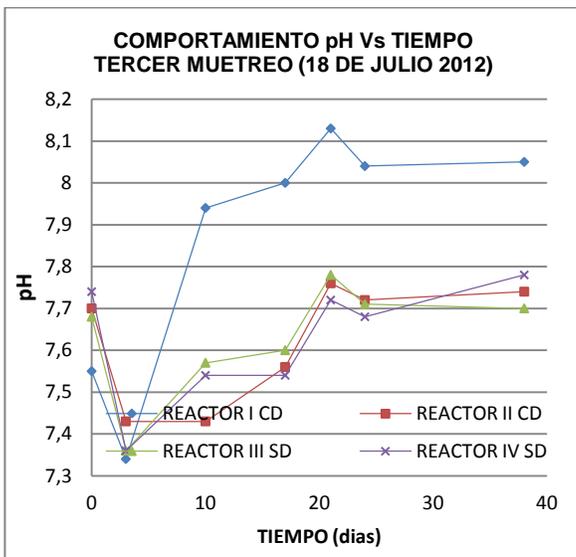
MUESTREO 1 (6 DE JUNIO 2012)			
REACTOR 1		REACTOR 2	
TIEMPO (días)	pH	TIEMPO (días)	pH
0	6,46	0	6,46
5	8,23	5	8,26
8	8,23	8	8,24
12	8,27	12	8,26
15	8,28	15	8,29
18	8,03	18	8
22	8,24	22	8,21
26	8,09	26	8,11
27	7,8	27	7,89
29	7,96	29	7,95
33	7,77	33	7,75
36	7,9	36	8
40	7,89	40	7,9
42	7,8	42	7,79
47	8,01	47	8
55	7,94	55	7,93
57	7,95	57	7,95
64	8	64	8,01
68	8,13	68	8,03
71	8,04	71	8,03
84	8,05	84	7,97



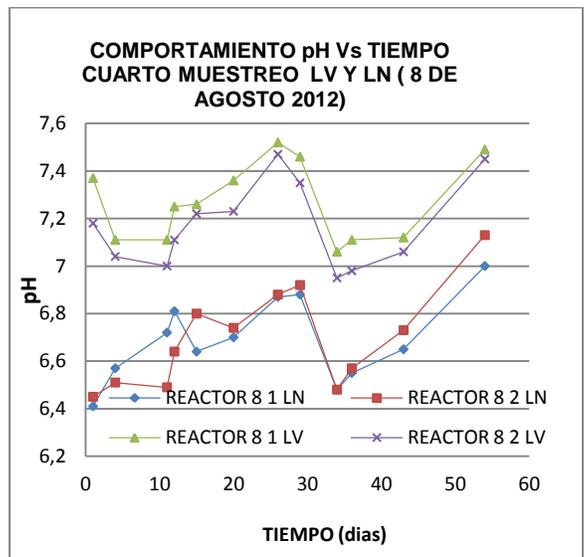
ANEXO 2. Gráfica comportamiento de pH Vs tiempo primer muestreo rectores anaerobios



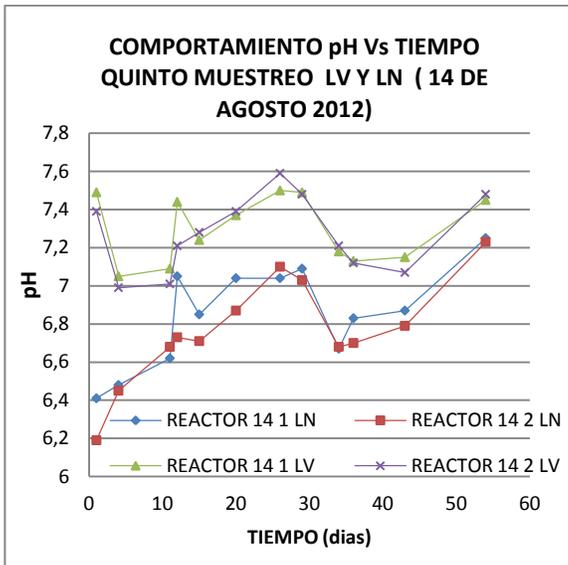
ANEXO 3. Gráfica comportamiento de pH Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobios



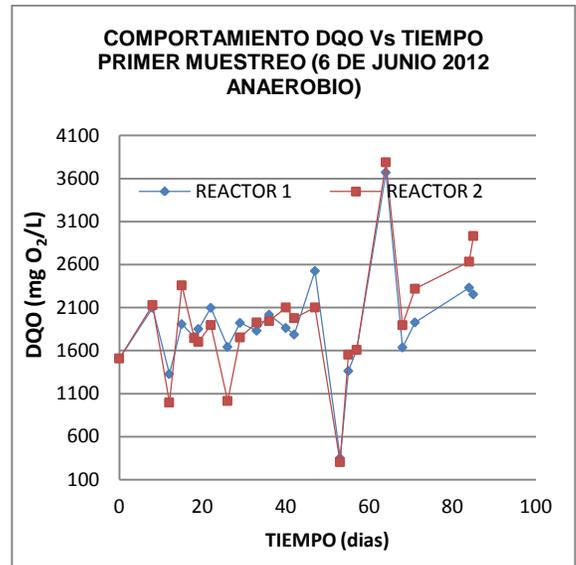
ANEXO 4. Gráfica comportamiento de pH Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución (CD) y sin dilución (SD)



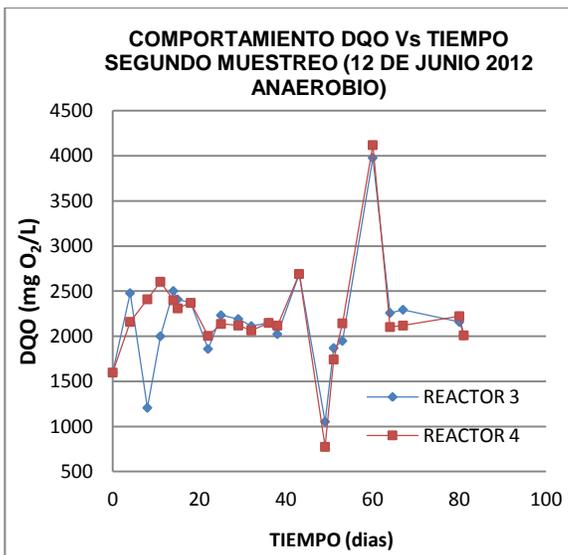
ANEXO 5. Gráfica comportamiento de pH Vs tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) lodo de la empresa Postobon (LN)



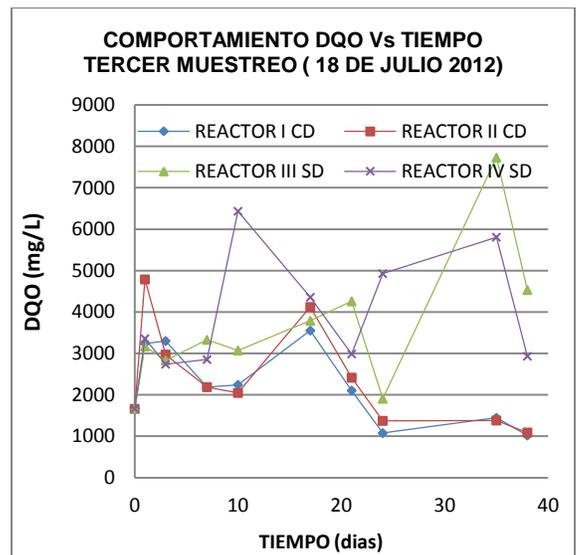
ANEXO 6. Gráfica comportamiento del pH Vs tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) lodo de la empresa Postobon (LN)



ANEXO 7. Gráfica comportamiento de la DQO Vs tiempo primer muestreo reactores anaerobio



ANEXO 8. Gráfica comportamiento de la DQO Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobio



ANEXO 9. Gráfica comportamiento de la DQO Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobio con dilución (CD) y sin dilución (SD)

ANEXO 10. Tabla comportamiento de pH Vs tiempo segundo muestreo reactores anaerobios

MUESTREO 2 (12 DE JUNIO 2012)			
REACTOR 3		REACTOR 4	
TIEMPO (días)	pH	TIEMPO (días)	pH
0	9,98	0	9,98
4	8,12	4	8,14
8	8,14	8	8,14
11	8,13	11	8,2
14	7,87	14	7,93
18	8,02	18	8,11
22	7,96	22	7,94
25	7,82	25	7,86
29	7,71	29	7,74
32	7,82	32	7,88
36	7,73	36	7,77
38	7,72	38	7,8
43	7,88	43	7,92
51	7,83	51	7,84
53	7,86	53	7,83
60	7,91	60	7,95
64	8,01	64	8,05
67	7,95	67	8,01
80	7,99	80	8,04

ANEXO 11. Tabla comportamiento de pH Vs tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución (CD) y sin dilución (SD)

MUESTREO 3 (18 DE JULIO 2012)			
REACTOR I CD		REACTOR II CD	
TIEMPO (días)	pH	TIEMPO (días)	pH
0	7,55	0	7,7
3	7,34	3	7,43

10	7,94	10	7,43
17	8	17	7,56
21	8,13	21	7,76
24	8,04	24	7,72
38	8,05	38	7,74
REACTOR III SD		REACTOR IV SD	
TIEMPO (días)	pH	TIEMPO (días)	pH
0	7,68	0	7,74
3	7,36	3	7,36
10	7,57	10	7,54
17	7,6	17	7,54
21	7,78	21	7,72
24	7,71	24	7,68
38	7,7	38	7,78

ANEXO 12. Tabla comportamiento de pH Vs tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN)

MUESTREO 4 LODO NUEVO Y LODO VIEJO (8 DE AGOSTO 2012)				
	REACTOR 8 1 LN	REACTOR 8 2 LN	REACTOR 8 1 LV	REACTOR 8 2 LV
TIEMPO (días)	pH	pH	pH	PH
1	6,41	6,45	7,37	7,18
4	6,57	6,51	7,11	7,04
11	6,72	6,49	7,11	7
12	6,81	6,64	7,25	7,11
15	6,64	6,8	7,26	7,22
20	6,7	6,74	7,36	7,23
26	6,87	6,88	7,52	7,47
29	6,88	6,92	7,46	7,35
34	6,48	6,48	7,06	6,95
36	6,55	6,57	7,11	6,98

43	6,65	6,73	7,12	7,06
54	7	7,13	7,49	7,45

ANEXO 13. Tabla comportamiento de pH Vs tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) lodo de la empresa Postobon (LN)

MUESTREO 5 LODO VIEJO Y LODO NUEVO (14 DE AGOSTO 2012)				
	REACTOR 14 1 LN	REACTOR 14 2 LN	REACTOR 14 1 LV	REACTOR 14 2 LV
TIEMPO (días)	pH	pH	pH	pH
1	6,41	6,19	7,49	7,39
4	6,48	6,45	7,05	6,99
11	6,62	6,68	7,09	7,01
12	7,05	6,73	7,44	7,21
15	6,85	6,71	7,24	7,28
20	7,04	6,87	7,37	7,39
26	7,04	7,1	7,5	7,59
29	7,09	7,03	7,49	7,48
34	6,67	6,68	7,18	7,21
36	6,83	6,7	7,13	7,12
43	6,87	6,79	7,15	7,07
54	7,25	7,23	7,45	7,48

ANEXO 14. Tabla comportamiento de la DQO y porcentaje de remoción en el tiempo primer muestreo reactores anaerobio

MUESTREO 1 ENSAYO ANAEROBIO				
	REACTOR 1		REACTOR 2	
TIEMPO (horas)	DQO (mg O₂/L)	Tasa de Remoción (mg/h)	DQO (mg O₂/L)	Tasa de Remoción (mg/h)
0	1508,7	0,00	1508,7	0,00
192	2097,2	-4,79	2128,8	-5,06
288	1326,88	4,30	996,18	6,29

360	1907,24	-2,49	2358,4	-5,91
432	1759,3	0,58	1745,45	2,27
456	1850,97	-0,27	1702,26	0,19
528	2096,64	-0,68	1896,96	-0,54
624	1642,88	1,28	1014,72	2,27
696	1921,6	-0,57	1753,46	-1,55
792	1830,84	0,19	1927,2	-0,30
864	2016,9	-0,29	1944	-0,01
960	1862,64	0,25	2101,44	-0,22
1008	1786,5	0,13	1977,06	0,20
1128	2524,9	-0,91	2101,44	-0,14
1272	351,15	2,43	304,33	2,01
1320	1363,1	-1,07	1553,3	-1,32
1368	1608,42	-0,24	1608,42	-0,04
1536	3670,4	-1,84	3788,8	-1,95
1632	1636,11	1,83	1895,81	1,73
1704	1927,2	-0,21	2319	-0,30
2016	2331,72	-0,24	2633,98	-0,18
2040	2253,39	0,06	2931,83	-0,17

ANEXO 15. Tabla comportamiento de la DQO y porcentajes de remoción en el tiempo segundo muestreo reactores anaerobio

TIEMPO(horas)	DQO (mg O ₂ /l)	Tasa de Remoción mg/h	DQO (mg O ₂ /l)	Tasa de Remoción mg/h
0	1598,7	0,00	1598,7	0,00
96	2479	-14,41	2160,6	-9,14
192	1207,7	10,59	2411,2	-1,95
264	2000,8	-4,67	2605,2	-1,06
336	2503	-13,17	2400	1,03
360	2409,69	10,64	2310,55	0,45
432	2371,2	0,19	2371,2	-0,16
528	1860,32	1,53	2005,28	1,11

600	2233,86	-0,73	2137,78	-0,12
696	2192,19	0,12	2119,92	0,07
768	2114,1	0,18	2065,5	0,13
864	2149,2	-0,03	2149,2	-0,12
912	2024,7	0,22	2119,98	0,07
1032	2691,66	-0,90	2691,66	0,33
1176	1053,45	1,99	775,21	1,36
1224	1870,3	-0,93	1743,5	-1,10
1272	1949,6	-0,07	2144,56	-0,42
1440	3978,24	-1,93	4120,32	-1,88
1536	2259,39	1,56	2103,57	1,83
1608	2295,2	0,13	2119,92	0,13
1920	2159	0,10	2223,77	-0,06
1944	2011,09	0,11	2011,09	0,15

ANEXO 16. Tabla comportamiento de la DQO y porcentajes de remoción en el tiempo tercer muestreo reactores anaerobio con dilución (CD) y sin dilución (SD)

MUESTREO 3 ENSAYO ANAEROBIO				
REACTOR I CD			REACTOR II CD	
TIEMPO (horas)	DQO (mg O₂/l)	Tasa de Remoción mg/h	DQO (mg O₂/l)	Tasa de Remoción mg/h
0	1662,64	0,00	1662,64	0
24	3239,52	-199,90	4787,82	-396,86
72	3300,81	-2,14	2973,07	77,36
168	2187,3	20,30	2187,3	14,36
240	2242,04	-0,13	2047,08	2,28
408	3552	-9,46	4120,32	-15,01
504	2103,57	8,56	2415,21	10,07
576	1076,23	5,29	1373,13	5,37
840	1446,53	-1,11	1381,8	0,15
912	1017,6	1,34	1090,35	0,92
REACTOR III SD			REACTOR IV SD	

TIEMPO (horas)	DQO (mg O ₂ /l)	Tasa de Remoción mg/h	DQO (mg O ₂ /l)	Tasa de Remoción mg/h
0	1662,64	0,00	1662,64	0
24	3168,06	-190,81	3358,62	-215,05
72	2832,61	14,62	2738,97	26,66
168	3328,5	-8,78	2853	-1,90
240	3070,62	4,03	6433,68	-43,64
408	3788,8	-5,14	4357,12	15,24
504	4259,1	-2,68	2986,55	8,12
576	1905,9	12,10	4928,4	-9,87
840	7729,22	-19,39	5807,7	-2,32
912	4531,01	9,98	2931,8	8,97

ANEXO 17. Tabla porcentajes de remoción muestreos del 1 al 3 ensayo anaerobio

% REMOCION ENSAYO ANAEROBIO	
MUESTREOS DEL 1 AL 3	
MUESTREO 1 (6 DE JUNIO 2012)	
REACTORES	% DE REMOCION TOTAL
REACTOR 1	-15,75
REACTOR 2	-50,60
MUESTREO 2 (12 DE JUNIO 2012)	
REACTOR 3	2,51
REACTOR 4	2,51
MUESTREO 3 (18 DE JULIO 2012)	
REACTOR I CD	43,59
REACTOR II CD	39,56
REACTOR III CD	-151,16
REACTOR IV CD	-62,51

ANEXO 18. Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo primer muestreo reactores anaerobios

MUESTREO 1 (6 DE JUNIO 2012)			
REACTOR 1		REACTOR 2	
TIEMPO (DIAS)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	TIEMPO (DIAS)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)
1	51	1	15
2	68,5	2	23,2
3	86	3	31,4
4	103,5	4	39,6
5	121	5	47,8
6	138	6	64,8
7	180,2	7	107,3
8	221,7	8	138,3
9	245,4	9	166,9
10	269,1	10	195,5
11	292,8	11	224,1
12	316,5	12	252,7
13	358,5	13	294,7
14	374	14	308,2
15	385,5	15	329,7
16	405,2	16	351
17	424,9	17	372,3
18	444,6	18	393,6
19	455,6	19	401,6
20	483,6	20	427,6
21	511,1	21	438,1
22	562,1	22	490,1
23	566,1	23	491,2
24	570,1	24	492,3
25	574,1	25	493,4
26	578,1	26	494,5
27	598,6	27	498,5
28	601,6	28	502,5

29	610,1	29	505,5
30	610,7	30	507
31	611,3	31	508,5
32	611,9	32	510
33	612,5	33	511,5
34	773,5	34	513,5
35	973,5	35	515,5
36	988	36	517
37	1164	37	520,5
38	1340	38	524
39	1516	39	527,5
40	1537,4	40	532
41	1549,9	41	535,5
42	1551,1	42	538,3
43	1552,3	43	541,1
44	1553,5	44	543,9
45	1554,7	45	546,7
46	1555,9	46	549,5
47	1557,1	47	552,3
48	1560,6	48	557,3
49	1563,9	49	564,4
50	1569,9	50	570,9
51	1571,4	51	573,9
52	1572,9	52	576,9
53	1574,4	53	579,9
54	1577,9	54	584,4
55	1579,4	55	586,9
56	1585,9	56	587,4
57	1589,9	57	598,9
58	1591,1	58	600,1
59	1592,3	59	601,3
60	1593,5	60	602,5

61	1594,2	61	604,7
62	1594,9	62	606,9
63	1595,9	63	608,4
64	1596,9	64	608,4
65	1597,4	65	609,2
66	1597,9	66	610
67	1598,4	67	610,8
68	1600,9	68	610,8
69	1601,9	69	612,8
70	1604,9	70	613,8
71	1605,9	71	614,8
72	1606,9	72	616,2
73	1607,9	73	617,6
74	1608,9	74	619
75	1609,9	75	620,4
76	1610,9	76	625,4
77	1611,9	77	625,4
78	1613,9	78	627,4
79	1615,4	79	629,9
80	1616,9	80	632,4
81	1618,4	81	634,9
82	1620,9	82	636,9

ANEXO 19 .Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo segundo muestreo reactores anaerobios

MUESTREO 2 (12 DE JUNIO 2102)			
REACTOR 3		REACTOR 4	
TIEMPO (días)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	TIEMPO (días)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)
1	356	1	16,5
2	486	2	25
3	495,9	3	30
4	505,8	4	35

5	515,7	5	40
6	525,6	6	45
7	575,6	7	53,5
8	592,1	8	60
9	603,1	9	72
10	611,8	10	76,8
11	620,5	11	81,6
12	629,2	12	86,4
13	646,7	13	91,4
14	667,7	14	100,9
15	687,2	15	111,4
16	701,2	16	118,4
17	703,9	17	123,6
18	706,6	18	128,8
19	709,3	19	134
20	712	20	139,2
21	729	21	155,2
22	757	22	165,2
23	767	23	173,2
24	769,7	24	174,8
25	772,4	25	176,4
26	775,1	26	178
27	777,8	27	179,6
28	783,3	28	184,1
29	791,8	29	189,6
30	800,8	30	197,6
31	802,3	31	199,8
32	803,8	32	202
33	805,3	33	204,2
34	810,8	34	208,7
35	815,8	35	212,2
36	817,5	36	214,7

37	819,2	37	217,2
38	820,9	38	219,7
39	822,6	39	222,2
40	824,3	40	224,7
41	826	41	227,2
42	832	42	233,7
43	840	43	241,7
44	849,5	44	248,2
45	852,3	45	248,5
46	855,1	46	248,8
47	857,9	47	249,1
48	859,9	48	250,1
49	861,9	49	251,1
50	864,4	50	251,6
51	865,9	51	252,6
52	866,4	52	253,3
53	866,9	53	254
54	867,4	54	254,7
55	869,1	55	255,9
56	870,8	56	257,1
57	873,3	57	261,1
58	874,8	58	262,1
59	875,6	59	262,6
60	876,4	60	263,1
61	877,2	61	263,6
62	879,2	62	264,6
63	881,7	63	265,6
64	883,7	64	265,6
65	885,2	65	266,6
66	886,4	66	267,6
67	887,6	67	268,6
68	888,8	68	269,6

69	890	69	270,6
70	891,5	70	272,1
71	894	71	273,1
72	897	72	274,1
73	899,8	73	275,8
74	902,6	74	277,5
75	905,4	75	279,2
76	910,9	76	282,2
77	915,9	77	284,7
78	919,9	78	287,2
79	923,3	79	289,1
80	926,7	80	291
81	930,1	81	292,9
82	933,5	82	294,8

ANEXO 20. Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo tercer muestreo reactores anaerobios con dilución (CD) y sin dilución (SD)

MUESTREO 3 (18 DE JULIO 2012)				
	REACTOR I CD	REACTOR II CD	REACTOR III SD	REACTOR IV SD
TIEMPO (DIAS)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)
1	68	69	8,5	9,5
2	214	221	559	13,3
3	379,3	387,7	759,7	13,3
4	544,6	554,4	960,4	13,3
5	709,9	721,1	1161,1	13,3
6	873,9	996,6	1467,6	14,1
7	915,9	1146,6	1492,8	260,1
8	922,9	1390,6	1492,8	848,1
9	1056,9	1552,6	1518	1212,1
10	1186,2	1694,6	1654,7	1322,8
11	1315,5	1836,6	1791,4	1433,5

12	1444,8	1978,6	1928,1	1544,2
13	1609,8	2148,6	2081,1	1843,2
14	1774,8	2318,6	2234,1	2142,2
15	1858,8	2440,6	2238,1	2742,2
16	1980,8	2568,6	2338,1	2952,2
17	2041,5	2569,3	2425,3	3151,5
18	2102,2	2570	2512,5	3350,8
19	2162,9	2570,7	2599,7	3550,1
20	2260,9	2660,7	2661,7	3552,6
21	2312,9	2716,7	2745,7	3770,6
22	2354,9	2758,7	2815,7	3772,6
23	2386,9	2790,7	2848,2	3772,6
24	2412,9	2821,7	2878,7	3774,1
25	2438,9	2852,7	2909,2	3775,6
26	2464,9	2883,7	2939,7	3777,1
27	2490,9	2914,7	2970,2	3778,6
28	2524,9	2942,7	2974,7	3780,1
29	2545,4	2959,2	2981,2	3782,1
30	2563,4	2970,2	2992,7	3783,1
31	2577,4	2984,2	3001	3784,8
32	2591,4	2998,2	3009,3	3786,5
33	2605,4	3012,2	3017,3	3788,5
34	2620,9	3026,4	3026,1	3791,7
35	2635,4	3041,9	3031,6	3794,7
36	2652,9	3058,4	3035,1	3797,7
37	2659,8	3063,6	3037	3799,8
38	2666,7	3068,8	3038,9	3801,9
39	2673,6	3074	3040,8	3804
40	2680,5	3079,2	3042,7	3806,1

**ANEXO 21 .Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo cuarto
muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y
lodo de la empresa Postobon (LN)**

MUESTREO 4 LODO VIEJO Y LODO NUEVO (8 DE AGOSTO 2012)				
	REACTOR 8 1 LV	REACTOR 8 2 LV	REACTOR 8 1 LN	REACTOR 8 2 LN
TIEMPO (DIAS)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)
1	28,5	37,5	5,75	31
2	57	75	11,5	62
3	85,5	112,5	17,25	93
4	114	150	23	124
5	189	165	109	196
6	241	167,5	189	267
7	285	193,5	275	353
8	303	195,13	338,8	414
9	321	196,76	402,6	475
10	339	198,39	466,4	536
11	357	200,02	530,2	597
12	465	208,02	584,2	631
13	533	216,52	650,2	687
14	649	216,52	710,2	687
15	673	227,02	754,2	729
16	711	227,69	788,2	769
17	749	228,36	822,2	809
18	787	229,03	856,2	849
19	833	230,53	896,2	901
20	859	232,53	924,2	931
21	895	234,03	948,2	969
22	940,6	235,53	963,4	991
23	986,2	237,03	978,6	1013
24	1031,8	238,53	993,8	1035
25	1077,4	240,03	1009	1057

26	1123	241,53	1024,2	1079
27	1127	242,53	1025,2	1080
28	1129	243,53	1028,2	1081
29	1141	248,53	1058,2	1109
30	1143,9	258,53	1067,95	1112
31	1146,8	268,53	1077,7	1115
32	1149,7	278,53	1087,45	1118
33	1152,6	288,53	1097,2	1121
34	1154,6	289,78	1106,45	1130,25
35	1156,6	291,03	1115,7	1139,5
36	1160,1	294,03	1122,7	1145
37	1162,3	303,03	1124,37	1148,5
38	1164,5	312,03	1126,04	1152
39	1166,7	321,03	1127,71	1155,5
40	1171,7	323,53	1130,71	1162
41	1174,7	324,03	1133,96	1164,72
42	1177,7	324,53	1137,21	1167,5
43	1183,2	326,53	1140,21	1172
44	1188,95	328,43	1142,11	1180,5
45	1184,7	330,33	1144,01	1189
46	1200,45	332,23	1145,91	1197,5
47	1206,2	334,13	1147,81	1206
48	1215,2	333,73	1153,81	1214
49	1229,7	334,73	1157,81	1215
50	1232,7	343,73	1163,81	1216
51	1241,5	347,23	1170,06	1218,5
52	1250,3	350,73	1176,31	1221
53	1259,1	354,23	1182,56	1223,5
54	1267,9	357,73	1188,81	1226

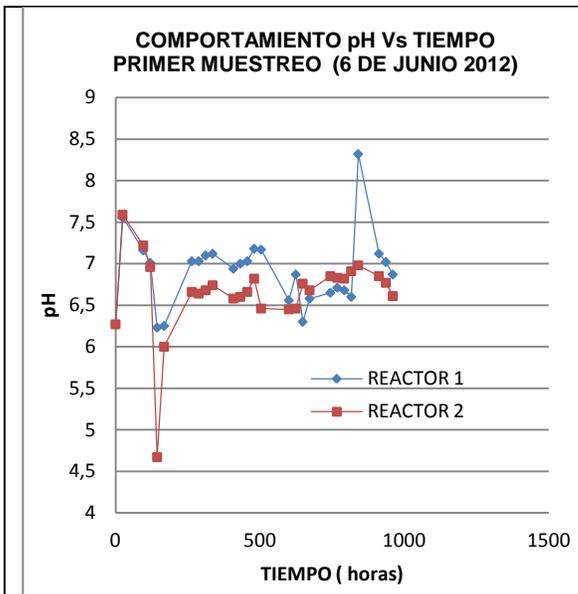
ANEXO 22 .Tabla volumen acumulado de biogás en el tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN)

MUESTREO 5 LODO NUEVO Y LODO VIEJO (14 DE AGOSTO 2012)				
	REACTOR 14 1 LN	REACTOR 14 2 LN	REACTOR 14 1 LV	REACTOR 14 2 LV
TIEMPO (DIAS)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)	VOLUMEN ACUMULADO (mL)
1	10	54,5	10	20,5
2	20	109	20	41
3	30	163,5	30	61,5
4	40	218	40	82
5	94	268	125	118
6	130	358	217	178
7	192	438	297	248
8	229	502,5	321	271
9	266	567	345	302
10	303	631,5	369	333
11	340	696	393	364
12	396	730	394,5	442
13	472	790	446,5	478
14	544	844	488,5	558
15	596	870	526,5	612
16	631	895	559,5	652
17	666	920	592,5	692
18	701	945	625,5	732
19	737	983	677,5	772
20	763	1009	677,5	795
21	794	1035	732,5	831
22	808,4	1043,5	854,1	845,6
23	822,8	1051,8	975,7	860,2
24	837,2	1060,2	1097,3	874,8
25	851,6	1068,6	1218,9	879,4

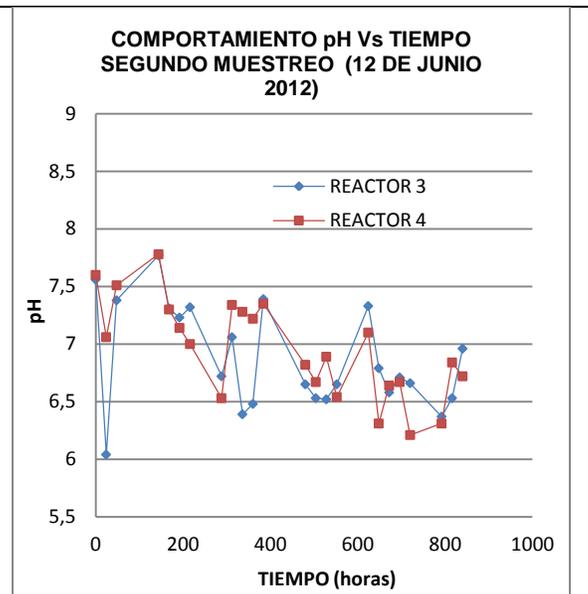
26	866	1077	1340,5	904
27	867	1078	1412,5	904
28	868	1083	1443,5	905
29	869,5	1098	1461	910,5
30	872,5	1145,5	1499,3	915,25
31	875,5	1193	1537,6	920
32	878,5	1240,5	1575,9	924,75
33	881,5	1288	1614,2	929,5
34	883,25	1289,25	1618,9	931
35	885	1290,5	1623,6	932,5
36	886	1292,5	1628,6	934,5
37	888	1293,17	1823,9	934,83
38	890	1293,84	2019,2	935,16
39	891	1294,51	2214,5	935,49
40	891,75	1305,01	2302	940,99
41	892,5	1306,01	2306,75	947,49
42	895	1307,01	2311,5	953,99
43	895,9	1310,01	2320,5	962,49
44	896,8	1311,26	2325,25	973,99
45	897,7	1312,51	2330	985,49
46	898,6	1313,76	2334,75	996,99
47	899,5	1315,01	2339,5	1008,49
48	900,5	1316,01	2363,5	1021,49
49	901,5	1317,01	2386	1026,99
50	902	1317,51	2389	1028,99
51	902	1318,01	2390	1029,39
52	902	1319,01	2391	1029,79
53	902	1320,01	2392	1030,19
54	902	1321,01	2393	1030,59

**ANEXO 23. Tabla comportamiento del pH en el tiempo primer
muestreo reactores aerobios**

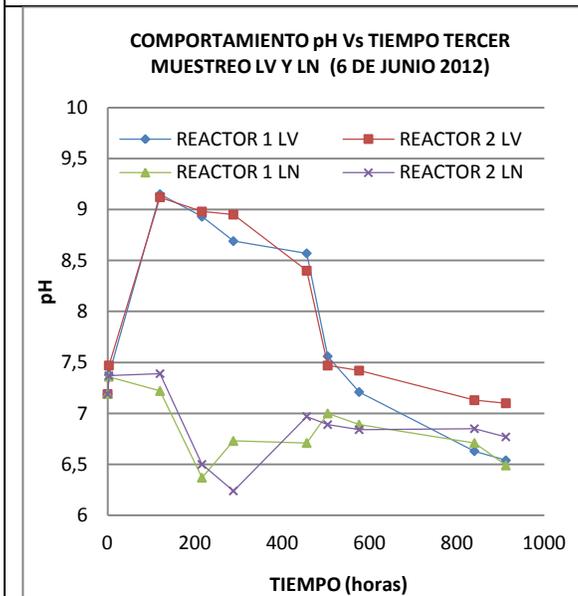
MUESTREO 1 (6 DE JUNIO 2012)			
REACTOR 1		REACTOR 2	
TIEMPO (horas)	pH	TIEMPO (horas)	pH
0	6,27	0	6,27
24	7,56	24	7,59
96	7,16	96	7,22
120	7,01	120	6,96
144	6,23	144	4,67
168	6,25	168	6
264	7,03	264	6,66
288	7,03	288	6,64
312	7,1	312	6,68
336	7,12	336	6,74
408	6,94	408	6,58
432	7	432	6,6
456	7,03	456	6,66
480	7,18	480	6,82
504	7,17	504	6,46
600	6,56	600	6,45
624	6,87	624	6,46
648	6,3	648	6,76
672	6,58	672	6,68
744	6,65	744	6,85
768	6,71	768	6,83
792	6,68	792	6,82
816	6,6	816	6,91
840	8,32	840	6,98
912	7,12	912	6,85
936	7,02	936	6,77
960	6,87	960	6,61



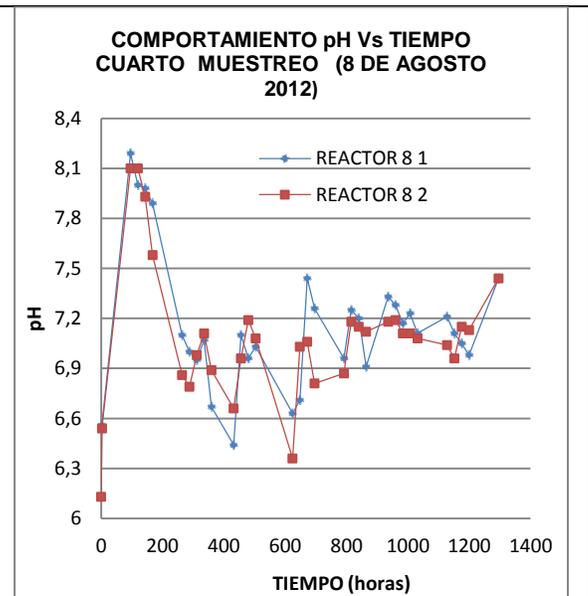
ANEXO 24. Gráfica comportamiento del pH Vs tiempo primer muestreo reactores aerobios



ANEXO 25. Gráfica comportamiento del pH Vs tiempo segundo muestreo reactores aerobios



ANEXO 26. Gráfica comportamiento del pH Vs tiempo tercer muestreo reactores aerobios lodo relleno sanitario de Yotoco, Cali (LV) y lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales UTP (LN)



ANEXO 27. Gráfica comportamiento del pH Vs tiempo cuarto muestreo reactores aerobios

ANEXO 28. Tabla comportamiento del pH en el tiempo segundo muestreo reactores aerobios

MUESTREO 2 (12 DE JUNIO 2012)			
REACTOR 3		REACTOR 4	
TIEMPO (horas)	pH	TIEMPO(horas)	pH
0	7,56	0	7,6
24	6,04	24	7,06
48	7,38	48	7,51
144	7,77	144	7,78
168	7,31	168	7,3
192	7,23	192	7,14
216	7,32	216	7
288	6,72	288	6,53
312	7,06	312	7,34
336	6,39	336	7,28
360	6,48	360	7,22
384	7,39	384	7,35
480	6,65	480	6,82
504	6,53	504	6,67
528	6,52	528	6,89
552	6,65	552	6,54
624	7,33	624	7,1
648	6,79	648	6,31
672	6,58	672	6,64
696	6,71	696	6,67
720	6,66	720	6,21
792	6,37	792	6,31
816	6,53	816	6,84
840	6,96	840	6,72

ANEXO 29. Tabla comportamiento del pH en el tiempo tercer muestreo reactores aerobios lodo relleno sanitario de Yotoco, Cali (LV) y lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales UTP (LN)

MUETREO 3 (18 DE JULIO 2012)			
REACTOR 1 LV		REACTOR 2 LV	
TIEMPO (horas)	pH	TIEMPO (horas)	pH
0	7,19	0	7,19
3	7,38	3	7,47
120	9,15	120	9,12
216	8,93	216	8,98
288	8,69	288	8,95
456	8,57	456	8,4
504	7,6	504	7,47
576	7,21	576	7,42
840	6,63	840	7,13
912	6,54	912	7,1
REACTOR 1 LN		REACTOR 2 LN	
TIEMPO (horas)	pH	TIEMPO (horas)	PH
0	7,19	0	7,19
3	7,36	3	7,37
120	7,22	120	7,39
216	6,37	216	6,5
288	6,73	288	6,24
456	6,71	456	6,97
504	7,0	504	6,89
576	6,89	576	6,84
840	6,71	840	6,85
912	6,49	912	6,77

ANEXO 30. Tabla comportamiento del pH en el tiempo tercer muestreo reactores aerobios

MUESTREO 4 (8 DE AGOSTO 2012)

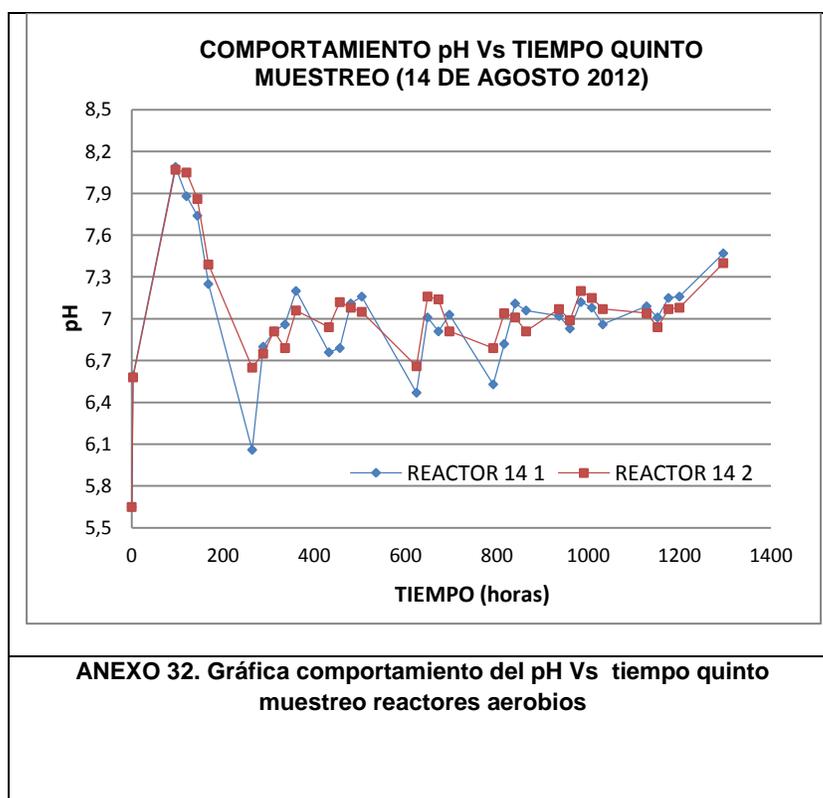
TIEMPO (horas)	REACTOR 8 1	TIEMPO (horas)	REACTOR 8 2
0	6,13	0	6,13
3	6,56	3	6,54
96	8,19	96	8,1
120	8	120	8,1
144	7,98	144	7,93
168	7,89	168	7,58
264	7,1	264	6,86
288	7	288	6,79
312	6,95	312	6,98
336	7,07	336	7,11
360	6,67	360	6,89
432	6,44	432	6,66
456	7,1	456	6,96
480	6,96	480	7,19
504	7,03	504	7,08
624	6,63	624	6,36
648	6,71	648	7,03
672	7,44	672	7,06
696	7,26	696	6,81
792	6,96	792	6,87
816	7,25	816	7,18
840	7,2	840	7,15
864	6,91	864	7,12
936	7,33	936	7,18
960	7,28	960	7,19
984	7,17	984	7,11
1008	7,23	1008	7,11
1032	7,11	1032	7,08
1128	7,21	1128	7,04
1152	7,11	1152	6,96
1176	7,05	1176	7,15

1200	6,98	1200	7,13
1296	7,44	1296	7,44

ANEXO 31. Tabla comportamiento del pH en el tiempo quinto muestreo reactores aerobios

MUESTREO 5 (14 DE AGOSTO 2012)			
TIEMPO (horas)	pH REACTOR 14 1	TIEMPO (horas)	pH REACTOR 14 2
0	5,65	0	5,65
3	6,59	3	6,58
96	8,09	96	8,07
120	7,88	120	8,05
144	7,74	144	7,86
168	7,25	168	7,39
264	6,06	264	6,65
288	6,8	288	6,75
312	6,91	312	6,91
336	6,96	336	6,79
360	7,2	360	7,06
432	6,76	432	6,94
456	6,79	456	7,12
480	7,11	480	7,08
504	7,16	504	7,05
624	6,47	624	6,66
648	7,01	648	7,16
672	6,91	672	7,14
696	7,03	696	6,91
792	6,53	792	6,79
816	6,82	816	7,04
840	7,11	840	7,01
864	7,06	864	6,91
936	7,02	936	7,07
960	6,93	960	6,99

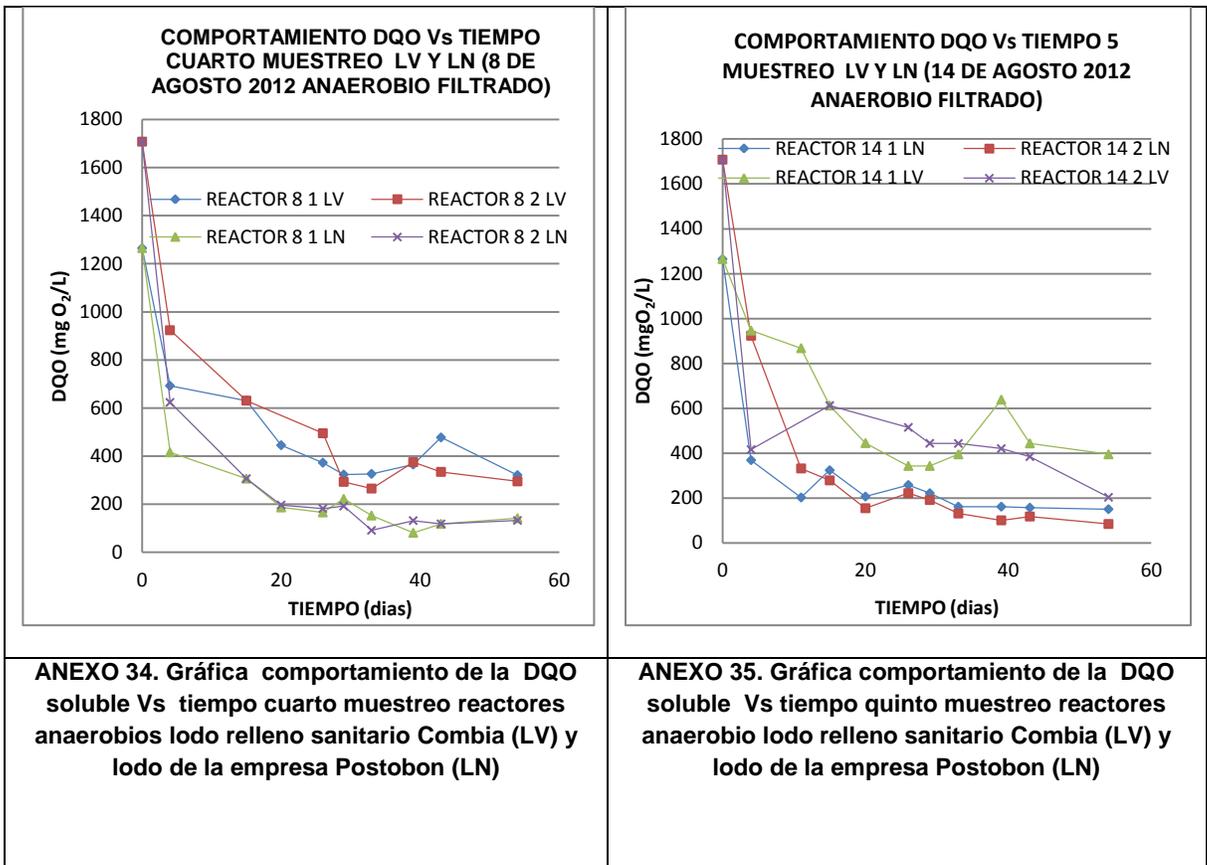
984	7,12	984	7,2
1008	7,08	1008	7,15
1032	6,96	1032	7,07
1128	7,09	1128	7,04
1152	7,01	1152	6,94
1176	7,15	1176	7,07
1200	7,16	1200	7,08
1296	7,47	1296	7,4



ANEXO 33. Tablas comportamiento de la DQO soluble y porcentajes de remoción en el tiempo cuarto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN)

DQO INICIAL: 1265 mg O₂/L

MUESTREO 4 ENSAYO ANAEROBIO FILTRADO LV Y LN					
REACTOR 8 1 LV FILTRADO			REACTOR 8 2 LV FILTRADO		
TIEMPO (horas)	DQO (mg O ₂ /L)	Tasa de remoción mg/h	TIEMPO (horas)	DQO (mg O ₂ /L)	Tasa de remoción mg/h
96	692,7	18,33	96	923,6	10,99
360	630,84	0,54	360	630,84	2,50
480	445,31	1,23	624	495,1	0,71
624	372,82	0,35	696	293,02	0,87
696	323,33	0,22	792	265,1	0,14
792	326,27	0,01	936	374,83	-0,35
936	364,97	-0,46	1008	334,49	0,12
1032	477,73	0,00	1296	294,87	0,09
1296	321,09	0,35			
REACTOR 8 1 LN FILTRADO			REACTOR 8 2 LN FILTRADO		
TIEMPO (días)	DQO (mg O ₂ /L)	Tasa de remoción mg/h	TIEMPO (días)	DQO (mg O ₂ /L)	Tasa de remoción mg/h
96	415,62	33,01	96	623,43	24,97
360	306,41	1,14	360	306,41	3,28
480	186,41	0,95	480	196,76	0,87
624	165,7	0,12	624	181,87	0,09
696	222,29	-0,29	696	191,98	-0,05
792	152,94	0,33	792	91,22	0,47
936	81,09	0,27	936	131,77	-0,15
1032	118,37	-0,13	1032	118,37	0,05
1296	141,7	-0,06	1296	132,22	-0,04



ANEXO 36. Tablas comportamiento de la DQO soluble y porcentajes de remoción en el tiempo quinto muestreo reactores anaerobios lodo relleno sanitario Combia (LV) y lodo de la empresa Postobon (LN)

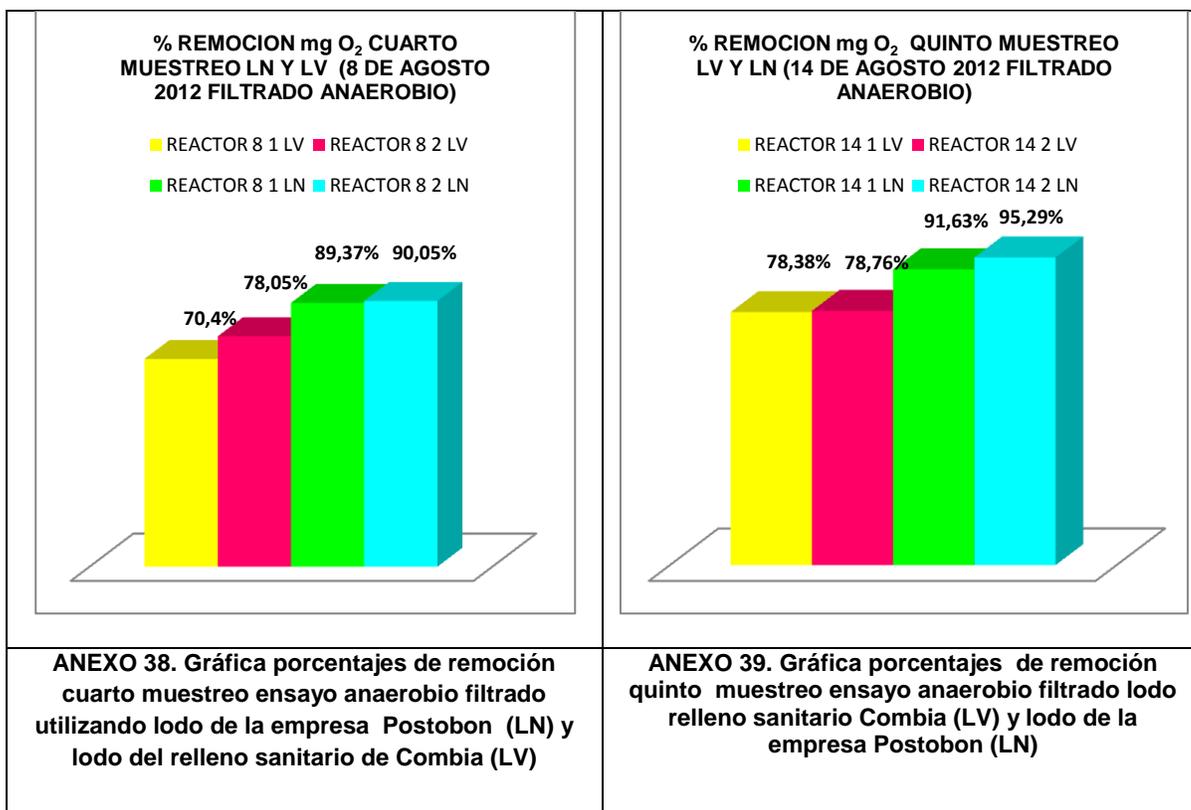
DQO INICIAL: 1708 mgO₂ / L

TIEMPO (horas)	DQO (mg O ₂ /L)	tasa de remoción mg/h	TIEMPO (horas)	DQO (mg O ₂ /L)	tasa de remoción mg/h
96	369,4	51,99	96	923,6	30,54
264	203,2	2,35	264	332,5	8,33
360	324,43	-1,24	360	279,37	0,55
480	207,12	0,93	480	155,34	0,97
624	258,9	-0,30	624	222,29	-0,39
696	222,29	0,19	696	191,98	0,16
792	162,18	0,29	792	131,77	0,28
936	162,18	0,00	936	101,36	0,12

1032	157,83	0,02	1032	118,37	-0,06
1296	151,1	0,02	1296	84,99	0,09
REACTOR 14 1 LV FITRADO			REACTOR 14 2 LV FILTRADO		
TIEMPO (horas)	DQO (mg O₂/L)	tasa de remoción mg/h	TIEMPO (horas)	DQO (mg O₂/L)	tasa de remoción mg/h
96	946,69	36,19	96	416,7	53,04
264	868,18	0,94	360	612,82	-1,65
360	612,82	2,18	624	515,5	0,52
480	445,31	1,11	696	444,58	0,31
624	343,54	0,49	792	443,87	0,04
696	343,54	0,00	936	420,97	0,08
792	395,3	-0,16	1032	385,17	0,10
936	638,6	-0,75	1296	203,92	0,40
1032	443,87	0,55			
1296	395,43	0,11			

ANEXO 37. Tabla porcentajes de remoción muestreos 4 y 5 filtrados ensayo anaerobio, utilizando lodo de la empresa Postobon (LN) y lodo del relleno sanitario de Combia (LV)

% REMOCION MUESTREO 4 Y 5 ENSAYO ANAEROBIO FILTRADO	
REACTOR	% DE REMOCION TOTAL
REACTORES ANAEROBIOS	
MUESTREO 5 (8 DE AGOSTO 2012)	
REACTOR 8 1 LV	70,4
REACTOR 8 2 LV	78,05
REACTOR 8 1 LN	89,37
REACTOR 8 2 LN	90,05
MUESTREO 5 (14 DE AGOSTO 2012)	
REACTOR 14 1 LV	78,38
REACTOR 14 2 LV	78,76
REACTOR 14 1 LN	91,63
REACTOR 14 2 LN	95,29



ANEXO 40. Tabla comportamiento DQO reactores aerobios

REACTORES AEROBIOS							
MUESTREO 1		MUESTREO 2		MUESTREO 3			
REACTOR 1	REACTOR 2	REACTOR 3	REACTOR 4	REACTOR 1 LV	REACTOR 2 LV	REACTOR 1 LN	REACTOR 2 LN
DQO (mg O ₂ /L)							
1508,74	1508,74	1598,7	1598,7	1267	1267	1110	1110
963,17	996,58	1646,44	1263,02	1195	1301	981	1043
936,78	1006,9	1323,44	964,52	843	838	548	548
876,58	956,48	1152,35	880,5	875	875	590	495
882,76	899,85	1227,34	779,5	897	634	512	507
813,67	872,71	847,63	743,56	1397	1478	772	905
717,14	729,45	898,56	833,66	1101	847	338	338
788,74	813,7	816,68	792,66	1102	955	287	331
725,4	763,84	713,06	775,7	1157	1036	345	86

693,79	770,88	811,62	782,46	1241	1071	483	194
763,02	816,48	792,82	649,54				
721,18	807,14	790,82	757,48				
738,42	809,88	1033,79	843,23				
824,17	938,51						

REACTORES AEROBIOS			
MUESTREO 4		MUESTREO 5	
REACTOR 8 1	REACTOR 8 2	REACTOR 14 1	REACTOR 14 2
DQO (mg O ₂ /L)			
1333,44	1416,78	1333,44	1314,92
1449,19	1370,48	1426,04	1490,86
623,43	683,46	674,23	572,63
576,77	630,84	711,95	540,72
576,77	540,72	711,95	445,31
269,26	269,26	569,68	424,6
545,62	394,06	596,14	495,1
479,2	260	530,19	458,8
473,47	335,38	522,79	404,42
414,29	404,42	463,61	384,7
75,55	264,43	358,9	311,7

ANEXO 41. Tabla comportamiento DQO reactores anaerobios

REACTORES ANAEROBIOS LN				REACTORES ANAEROBIOS LV			
REACTOR 8 1	REACTOR 8 2	REACTOR 14 1	REACTOR 14 2	REACTOR 8 1	REACTOR 8 2	REACTOR 14 1	REACTOR 14 2
DQO mg O ₂ /L							
1620,5	1342,7	833,4	1389	2152,59	1643,65	1731,75	1431,58
848,7	757,01	942,07	646,52	4987,44	1081,44	1865,67	1126,79
666,89	414,24	874,16	486,65	2071,2	1306,74	1207,61	2330,1
445,31	464,78	683,5	414,24	2330,1	3210,36	3289,38	2172,36

404,16	444,58	507,44	372,82	1937,24	1915,86	1708,74	3384,84
438,43	456,12	540,39	414,26	1469,72	1566,12	2222,88	1794,36
628,43	385,17	527,07	405,44	1672,44	2179,25	1469,72	1692,45
648,76	483,34	415,58	293,94	1652,7	1936,02	1794,36	1690,5
217,01	443,87	641,16	394,02	1134,36	1824,84	1672,44	1419,04
283,32		574,95	500,53		1578,24	1584,5	